

PROYECTO FIN DE MASTER

# CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA RED DE TRANSPORTE PARA EL CÁLCULO DEL COSTE DE TRANSPORTE DE BIOMASA CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

---

Máster en Tecnologías de la Información Geográfica  
2012-2013

Autor: Juan Moreno López de la Reina

Tutores: María Eugenia Pérez González

Luis Saúl Esteban Pascual

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



## AGRADECIMIENTOS

*A mi familia y amigos por su paciencia y apoyo. Y a mis compañeros de curso que terminaron siendo amigos, gracias por la constante ayuda durante este año y los próximos.*

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. JUSTIFICACIÓN .....	4
2.1. Legislación.....	6
3. ZONA DE ESTUDIO .....	7
4. OBJETIVOS .....	9
5. RECURSOS Y FUENTES .....	10
5.1. Recursos.....	10
5.2. Fuentes .....	11
6. METODOLOGÍA.....	12
6.1. Análisis, mejora y caracterización de la red. Obtención de datos base .....	12
6.2. Transporte por campo y conexión de datos. Mapa y ecuaciones de costes .....	16
7. PROCESOS Y RESULTADOS .....	19
7.1. Procesos para la creación de la red de carreteras principales.....	19
7.2. Procesos para la caracterización de la red carreteras principales .....	27
7.3. Procesos para la integración de información del IGN .....	34
7.4. Procesos de análisis de red (NETWORK ANALYST) .....	38
7.5. Procesos raster de preparación de cálculos de costes.....	39
7.6. Procesos raster de cálculo de costes .....	40
8. CONCLUSIONES .....	45
9. BIBLIOGRAFÍA .....	46

## 1. INTRODUCCIÓN

Se puede decir que el sector medioambiental y las **energías renovables** (EERR) “están de moda”, y lo llevan estando desde hace tiempo. La sociedad desarrollada está adquiriendo una conciencia ecológica que en muchos casos no corresponde con la de las políticas de sus países. Sin ir más lejos, España ya ha pagado 420 millones de euros en derechos de emisiones de **efecto invernadero** por incumplimiento del Protocolo de Kioto. Según este acuerdo no podemos superar en un 15% nuestras emisiones de gases de efecto invernadero con respecto de lo que emitíamos en 1990. En 2010 emitíamos un 37% más (COITF, 2012). Estos hechos tienen efectos muy diversos, a corto plazo supone el inmediato aumento en la **tarifa eléctrica** que cobran las compañías, pero a medio y largo plazo supone el indiscutible y preocupante **cambio climático**, o aceleración de éste, que está sufriendo el planeta. La superficie forestal quemada el pasado año es un verdadero perjuicio económico y medioambiental. En lo referente a emisiones de CO<sub>2</sub>, debemos señalar que además de lo emitido por la combustión del incendio, se debe sumar el CO<sub>2</sub> no captado durante el crecimiento de la masa forestal perdida. La Asociación de Empresas Forestales (ASEMFO) asegura que 1 Ha de bosque absorbe 20 Toneladas (Tm) de CO<sub>2</sub>/año.

A pesar del gran **potencial energético** de España en lo que se refiere a EERR, con tecnología pionera sobre el recurso solar y eólico, sólo el 13,2% del consumo final bruto de energía correspondió a EERR en 2010 (IDAE, 2010). Es en el campo de la generación eléctrica donde las energías renovables se están mostrando más representativas con una participación del 30,3% (eólica 16,54%; hidroeléctrica 8,18%; solar fotovoltaica 2,82%; biomasa, biogás, RSU renovable y otros 1,58% y solar termoeléctrica 1,18%), consolidándose como la primera fuente de generación en el “MIX” en 2012. Las energías renovables están contribuyendo significativamente a cubrir nuestras necesidades (APPA, 2011). Estos datos muestran que la energía procedente de la biomasa aún no puede ser considerada en números como se merece, ya que su potencial e importancia socioeconómica puede convertirla en pocos años en una de las principales fuentes energéticas.

Así, la utilización de la biomasa, y en particular la **biomasa forestal**, como fuente energética debe ser una prioridad para España por numerosos motivos: porque es un método de energía limpio, que no contamina, ya que las emisiones de CO<sub>2</sub> que produce se ven compensadas con el crecimiento de nuevas y existentes masas forestales o cultivos energéticos; porque se trata de una energía renovable y natural, y está localizado en nuestros montes y su aprovechamiento

genera puestos de trabajo en el medio rural, lo que permite mantener las poblaciones y vertebrar el territorio (conseguir que el monte mantenga personas y estas mantengan el monte); porque pone en valor, ante la sociedad rural, zonas que lo habían perdido, ayudando a que el número de incendios intencionados disminuya; porque los incendios forestales serán menos virulentos al producirse en montes con existencias de biomasa menores debidas a su aprovechamiento energético; porque reduce la dependencia energética exterior y, por tanto, mejora la balanza de pagos nacional; porque representa un ahorro por hogar del 50% de su factura energética frente a combustibles fósiles que contaminan; porque es un bien nacional que se desaprovecha en nuestros montes, mientras que sufragamos grandes infraestructuras para traer el gas o el petróleo desde miles de kilómetros, y no siempre de naciones estables políticamente que aseguren el abastecimiento o donde los niveles democráticos cumplan unos mínimos exigibles.

Todas estas ventajas que nos brinda la biomasa forestal hacen que sean muchos los sectores que apuesten por este recurso renovable desde el ámbito, no sólo social y ambiental, sino también desde el sector industrial y bajo el punto de vista económico, aunque desde este sea desde donde se aprecien las principales desventajas, que por supuesto las tiene. Una de las principales características de la biomasa es su **dispersión espacial**, siendo múltiples factores los causantes. Simplemente enumerando y definiendo los tipos principales de biomasa podemos ver que puede ser adquirida en múltiples ámbitos, dentro de los cuales la **productividad** resulta ser muy **heterogénea e irregular** tanto en el espacio como en el tiempo.

#### **Principales tipos de biomasa lignocelulósica o de origen vegetal.**

Biomasa forestal: residuos forestales generados en las operaciones silvícolas de limpieza, poda y cortas parciales o finales de los montes que pueden ser utilizados como combustibles orgánicos en aplicaciones eléctricas, térmicas y/o de co-combustión (IDAE, 2007).

Biomasa agrícola: residuos agrícolas generados en las operaciones de mantenimiento y cosechado y que pueden ser utilizados como combustibles orgánicos. Todavía no se ha generalizado el uso de residuos agrícolas como biomasa, aunque existen algunos proyectos con paja o podas de olivo (IDAE, 2007).

Cultivos energéticos: Son cultivos de especies vegetales destinados específicamente a la producción de biomasa para uso energético (IDAE, 2007).

## 2. JUSTIFICACIÓN

El factor medioambiental y social no es suficiente para desarrollar una industria emergente y colmada de dificultades sociales, políticas y técnicas. Debemos tener claro que la **Biomasa** como **Fuente de Energía** es un sector industrial, y no agroforestal ni medioambiental, y por muchas ventajas ambientales y sociales que nos aporte es necesaria la aportación económica que justifique la inversión en el intento del desarrollo y puesta en marcha del sector, considerándolo una apuesta firme como productor energético en el futuro.

Cada proyecto debe ser estudiado de forma concisa en cuanto a su viabilidad económica y temporal. Es necesario poner de acuerdo a numerosos agentes, puede plantearse qué será antes la planta de generación eléctrica o el suficiente suministro de biomasa de forma estable en el tiempo y en los precios (“el huevo o la gallina”). Por ello, es imprescindible realizar **estudios de suministro** para estimar los recursos disponibles, calcular los **costes de elaboración y transporte**, optimizar los procedimientos de trabajo y adaptar los medios para la recogida y transporte a las condiciones españolas de estructura de la propiedad forestal, de tamaño de las explotaciones y de falta de infraestructuras forestales apropiadas.

La ya comentada dispersión y heterogeneidad del producto hace que el uso de **Tecnologías de la Información Geográfica** (TIG) sea una herramienta básica e indispensable para el estudio de la viabilidad técnica y económica de cualquier planta de valorización de biomasa lignocelulósica. Con esta tecnología podemos conseguir optimizar los recursos y conocer el emplazamiento más adecuado de una planta de tratamiento o de consumo final de biomasa. Sin embargo, el proyecto que nos ocupa no trata de localizar dicho emplazamiento sino que, tras decidirse una localización, se debe determinar los recursos que son viables económicamente para el funcionamiento de, en este caso, una posible planta de generación eléctrica.

Un estudio tipo se puede dividir en 3 partes como muestra la figura 1, esquema general de cálculo de costes en las tres fases de **aprovechamiento de biomasa forestal**. Las tres partes se pueden realizar mediante el uso de TIG, lo que hace que la precisión y sobre todo, la rapidez en la elaboración de un estudio técnico y económico sea mucho más adecuada, rápida y sistemática, lo que conlleva a un menor coste en la elaboración de dichos estudios al hacer uso de información ya obtenida para otros usos como el Inventario Forestal Español y las redes de carreteras y vías forestales del IGN.

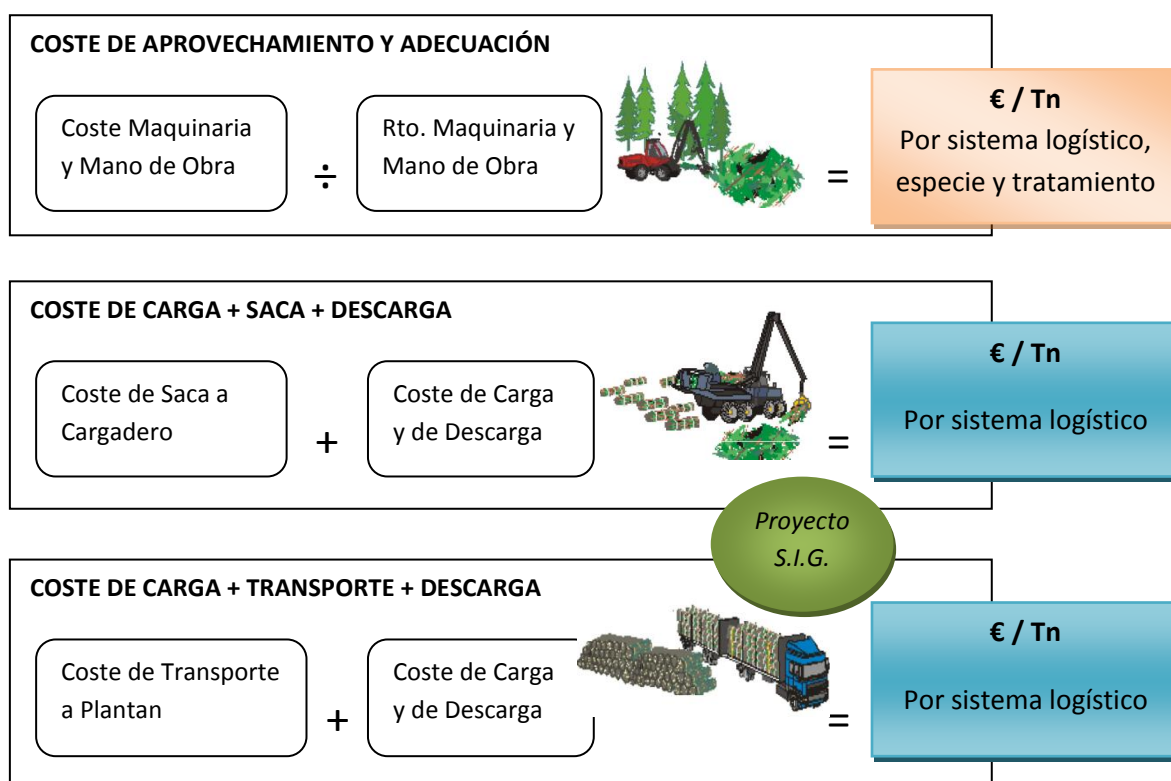
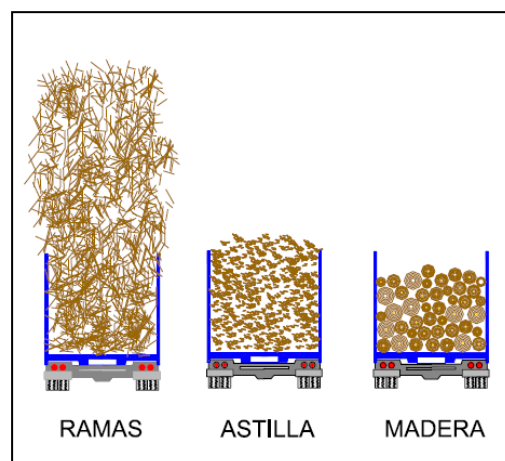


Figura 1. Esquema general del cálculo de costes. Elaboración propia

El coste de transporte de la madera representa el 20-40% de su precio en parque de fábrica y si hablamos del de la biomasa se acerca al 45% (COITF, 2011) ya que se ve muy afectado por el menor coeficiente de apilado. Los costes de saca y transporte de la biomasa son muy elevados por numerosos motivos: escaso valor añadido del producto, desconocimiento por parte de los gestores y de las empresas de aprovechamiento de cómo deben realizar la extracción y el transporte, inadecuación de la maquinaria empleada, coste de transporte en sí es muy elevado. Un análisis detallado de estos costes es esencial para poder sacar conclusiones sobre cada situación concreta.

Una adecuada red de transporte por carretera y una óptima densidad de vías forestales es un parámetro importante en la obtención de biomasa a precios asumibles debido al poco valor añadido del producto. La falta de infraestructura es uno de los principales problemas según las empresas españolas que



intervienen en el sector. Por estos motivos el estudio de los costes de saca, y sobre todo, los costes de transporte final a planta, de la biomasa, es de vital importancia para la viabilidad de un proyecto, así como la búsqueda de un modo más adecuado de conseguir esta información mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica.

## 2. 1. LEGISLACIÓN

La inclusión de este apartado sirve para justificar aún más la necesidad hoy en día de realizar estudios económicos de viabilidad de los proyectos. Hasta hace pocos meses estaba en vigor el **Real Decreto 661/2007**, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, impulsor de la creación de plantas de generación eléctrica como la causante de este proyecto. La generación eléctrica es el campo más débil en el uso de la biomasa debido a su bajo rendimiento. El Real Decreto 661 recoge la retribución a las energías renovables. Se han estructurado las tarifas teniendo en cuenta el origen y el tipo de biomasa, y se trata de tarifas o primas construidas y basadas en costes reconocidos, lo que hacía viables numerosos proyectos energéticos con biomasa.

Este real decreto, junto con la aprobación del PER 2011-2020, nos proporcionaba durante el pasado año, a pesar de la situación general de crisis económica, un esperanzador contexto del sector energético de la biomasa. El encarecimiento del combustible fósil importado se dispara, el Estado y la Unión Europea desean encarecidamente una menor dependencia de la energía externa, además, es medioambientalmente menos contaminante mejorando la calidad de vida.

Pero el contexto general de crisis económica que afecta en gran medida a nuestro país no podía pasar inadvertido para las EERR. El Gobierno aprueba en el Consejo de Ministros del viernes 27 de enero de 2012 el ***“Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos”***. Los motivos, los justifica el Gobierno, por la necesidad ante la compleja situación económica y financiera, así como a la situación del sistema eléctrico, siendo la lucha contra el déficit tarifario una de las razones fundamentales alegadas para justificar la necesidad de las medidas.

La suspensión afectará a las tecnologías acogidas al régimen especial, donde está incluida la biomasa. La norma no tiene carácter retroactivo, por lo que no afectará a las instalaciones ya en



marcha, ni a las primas ya autorizadas ni tampoco a las instalaciones ya inscritas en los registros de preasignación.

Este decreto supone el “apagón” energético de las renovables, lo que ha tenido consecuencias inmediatas con la suspensión de planes y proyectos, muchos ya en marcha y a la espera de financiación, tanto de empresas privadas como de organismos públicos. Por lo que el estudio de viabilidad, no sólo técnica, sino económica es aún de mayor importancia.

En cuanto a las afecciones de legislación sobre el trabajo debemos atender a las normativas de tráfico general y las de transporte de mercancías, Ley 5/1997, de 24 de marzo, de reforma del texto articulado de la Ley de Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial y el Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación, para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, aprobado por Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo. Principalmente deberemos tener cuidado en lo referente a velocidades máximas de circulación, principal factor a tener en cuenta y por el que se deberá caracterizar lo mejor posible la red de transporte general de carretera, esta velocidad máxima será difícilmente superable cuando el camión esté cargado de vuelta a la central de generación eléctrica. En cuanto a las capacidades de carga no existe problema ya que, como se verá más adelante, el tipo de camión y su volumen máximo de biomasa considerando el peso máximo de esta, no superará en ningún caso el Peso Máximo Autorizado de carga del camión.

### **3. ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio es consecuencia de la intención de una empresa privada de instalar una central de generación de energía eléctrica con biomasa como fuente de energía primaria. El emplazamiento de esta central viene determinado por encontrarse en terrenos aptos técnicamente para su construcción y situarse en una zona que a priori es adecuada para la obtención de la materia prima. Este lugar está situado en el término municipal de Miranda de Ebro, en la provincia de Burgos (Castilla y León), al sureste de la localidad (**Figura 2**).

Desde este punto se ha determinado un radio (**BUFFER**) de 150 kilómetros alrededor de dicha localización. La longitud de este radio ha sido la utilizada en otros estudios del Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER-CIEMAT) y nos asegura el adecuado estudio de todas las posibles zonas aptas para la elaboración y transporte de biomasa a planta.

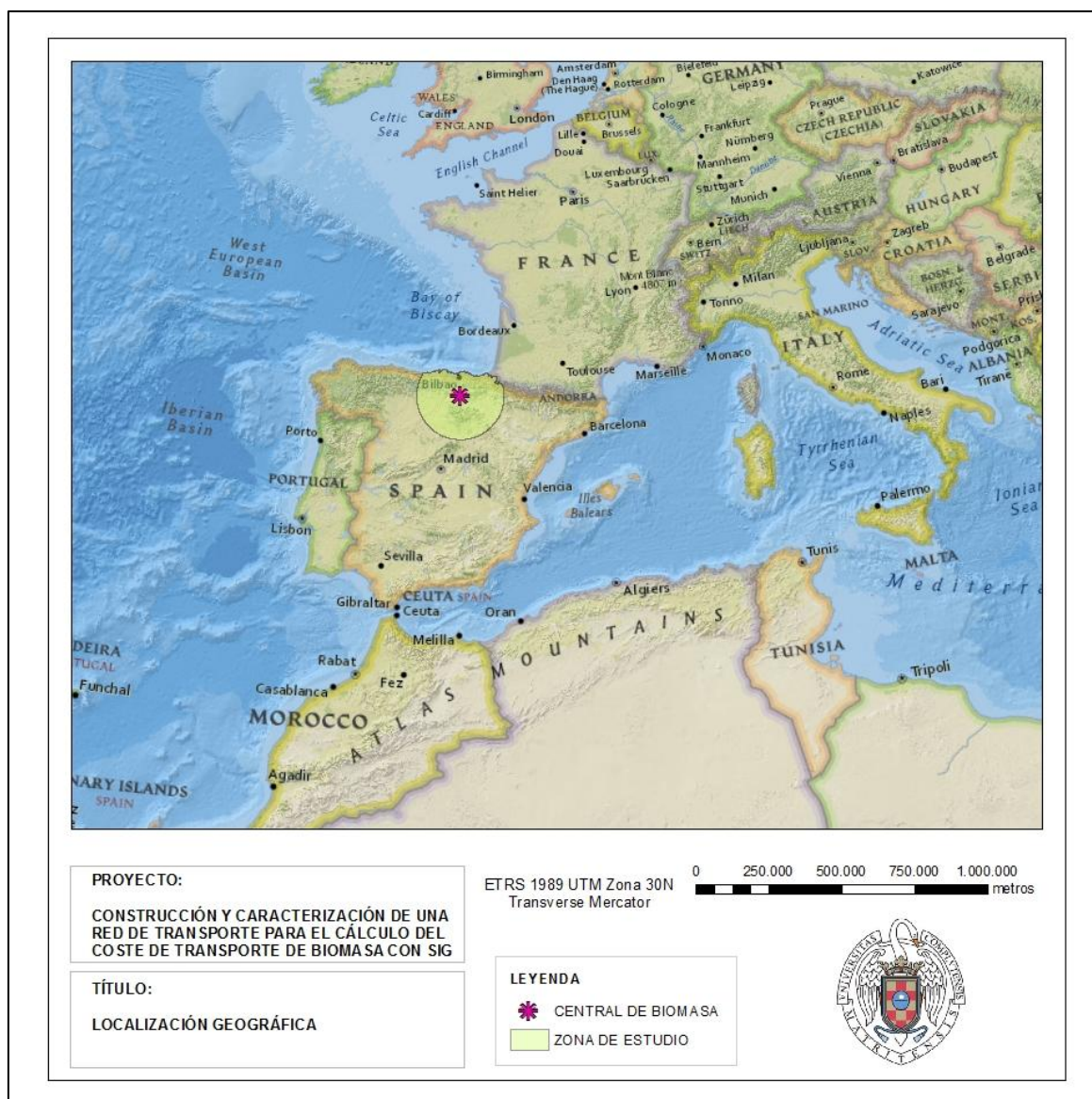


Figura 2. Área de estudio. Elaboración propia

En total el área de estudio tiene 57.261 km<sup>2</sup>, menor a lo que cabría esperar con el radio de estudio al encontrarnos con límite costero por el norte. En total aparecen 7 Comunidades Autónomas. Castilla y León con todo Burgos y parte de las provincias de Palencia, Soria, Segovia y Valladolid; La Rioja y el País Vasco en su totalidad; casi por completo las CCAA de Cantabria y Navarra; y parte de Zaragoza de la Comunidad Autónoma de Aragón.

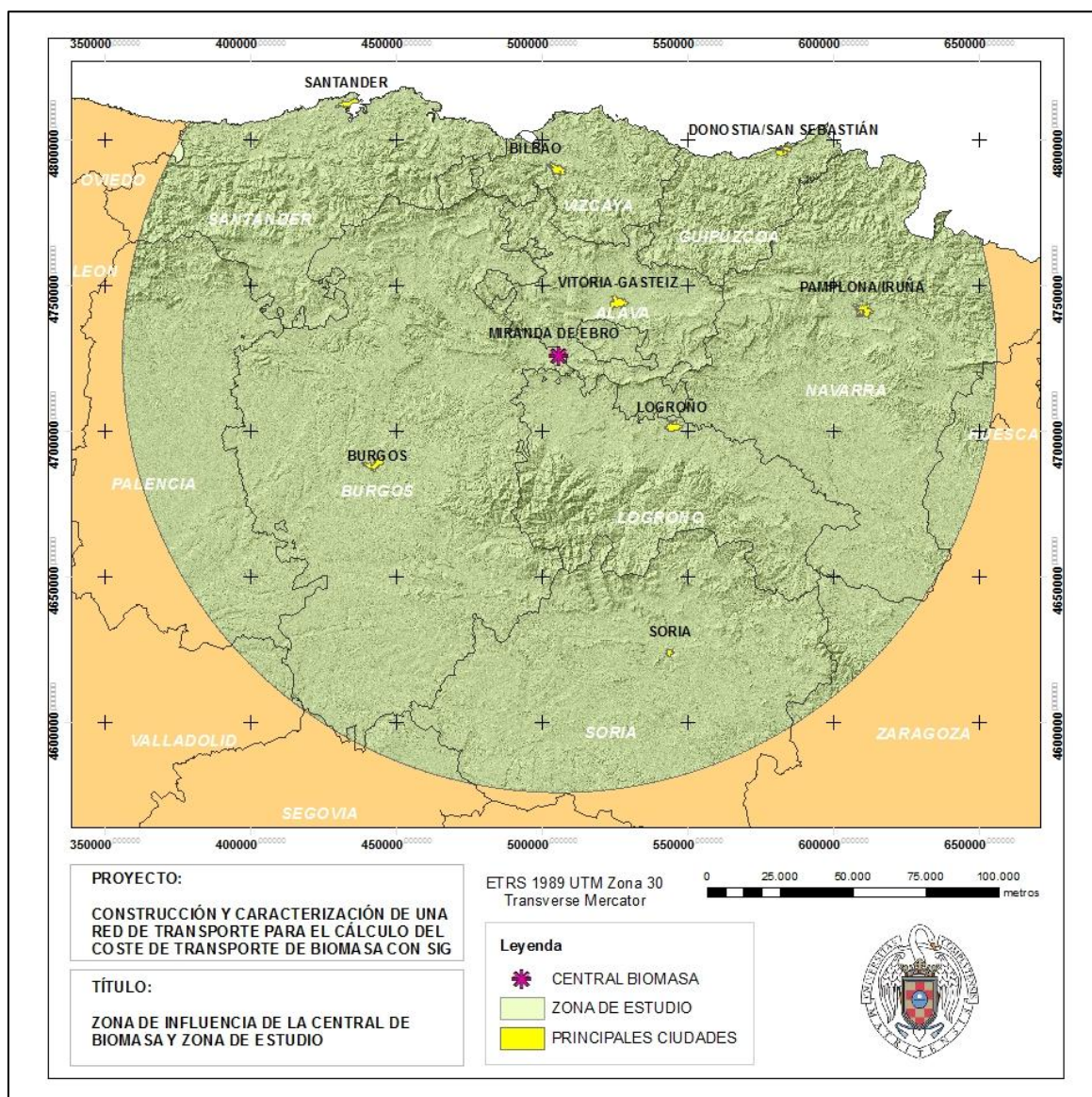


Figura 3. Detalle del área de estudio. Elaboración propia

A priori son provincias de marcado carácter forestal siendo estas superficies las principales zonas de estudio del proyecto en el que se engloba este. Pero aquí se ha querido abarcar la zona de estudio de forma continua por toda la superficie o radio de influencia, ya que no suponía un esfuerzo extra o innecesario.

#### 4. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es poder conocer de antemano el **Coste del Transporte de Biomasa Forestal** por tonelada hasta la Planta de Generación Eléctrica en Miranda de Ebro. Este objetivo se propone sobre la totalidad de la superficie de estudio ya que, además de las superficies forestales, muchas zonas agrícolas y terrenos baldíos, así como fábricas de primera



transformación pueden ser, de forma puntual o permanente, productoras de la necesaria materia prima. Así, no hemos querido diferenciar ni discriminar ninguna superficie dentro del radio de influencia, además, como ya hemos dicho, no supone un esfuerzo extra más que para el tiempo de análisis de las computadoras.

Para tal fin hemos llevado a cabo dos procesos claramente diferenciados en su tratamiento con Sistemas de Información Geográfica, dependiente el segundo del primero para conseguir un objetivo óptimo y preciso.

### **1. Creación y Caracterización de la Red de Transporte (PARTE VECTORIAL)**

La primera parte del trabajo consiste en la creación de la red a partir de la información SIG existente por ser de libre acceso o por su carácter de pública. No se trata de construir una red de transporte desde cero, sino en aprovechar lo existente, revisarlo, depurar errores y mejorarlo desde el punto de vista geométrico y de atributos, así como de contemplar la posibilidad de unir diferentes fuentes digitales y poder obtener una red lo más adecuada posible. Esta adecuación se basa principalmente en obtener una red completa y veraz, y en su caracterización para poder atribuir a cada tramo una **Velocidad Media** lo más cercana posible a la realidad.

### **2. Ecuación y Cartografía de Coste de Transporte de Biomasa (PARTE RASTER)**

Tras la obtención de la red de transporte estamos en disposición de obtener, mediante diferentes procesos SIG, cartografía que nos muestre los costes de transporte desde las superficies forestales hasta planta de biomasa, desglosados en las diferentes partes que presenta la ecuación general de costes, la cuál será construida y particularizada al sistema de aprovechamiento logístico del proyecto. Así, obtendremos un **Mapa Raster** final y único que nos proporcionará el **Coste de Transporte de Biomasa por Tonelada** (€/Tm).

## **5. RECURSOS Y FUENTES**

### **5. 1. RECURSOS**

Todos los procesos y análisis desarrollados en este proyecto se han realizado con **Sistemas de Información Geográfica** (SIG) utilizando el software de **ESRI** ArcGis 10.0 y su versión actualizada ArcGis 10.1 para determinados procesos mejorados en esta última versión de la marca. También se ha utilizado de forma puntual el lenguaje de programación Python para la obtención de una serie numérica y su inclusión en una de las opciones de la herramienta Análisis de Redes (*Network Analyst*) de ArcGis.

## 5 2. FUENTES

Como hemos comentado con anterioridad, todas las fuentes de datos cartográficos, digitales y de información técnica, se han obtenido de forma gratuita al pertenecer a fuentes de información de acceso libre o de carácter público. Este proyecto forma parte de un proyecto mayor en el que se hace un análisis total de costes de obtención de biomasa forestal realizado por el **Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER)** de Soria dependiente del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT, Ministerio de Economía y Competitividad). Este organismo nos ha proporcionado las direcciones web de gran parte de la información de base del proyecto. La proyección utilizada en el estudio es la “*Transverse Mercator*” y el sistema de coordenadas el “WGS 1984 UTM Zone 30N”, por lo que toda la información geográfica será transformada a este sistema.

Página web de la **compañía alemana GEOFABRIK** ([www.geofabrik.de](http://www.geofabrik.de)) que proporciona información digital de forma gratuita mediante la creación de plataformas SIG de uso público.

- Hemos obtenido la capa base de carreteras de “**Open Street Map**” cartografía digital creada por y para usuarios a nivel mundial, esta capa será analizada y verificada como totalmente adecuada.

La Agencia Estatal de Aeronáutica y Espacial de Estados Unidos (**NASA**, [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)) y El Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (**METI**, [www.meti.or.jp](http://www.meti.or.jp)) colaboran en un proyecto para desarrollar el Modelo de Elevación Global Digital (el ÁSTER GDEM), los datos del MDE (Modelo Digital de Elevaciones) son adquiridos por el sensor del satélite "ASTER" para cubrir toda la tierra sobre la tierra.

- Hemos obtenido los **Modelos Digitales de Elevaciones** para toda la zona de estudio dividida en hojas separadas que deberán unirse. Resolución de 27 metros y sistema de coordenadas WGS 1984.

Centro de Descargas del **Instituto Geográfico Nacional** (IGN, [www.ign.es](http://www.ign.es)) se han descargado las siguientes capas de información:

- Límites administrativos de Comunidades Autónomas y Provincias.
- Núcleos de Población y Zonas de Uso a nivel nacional.
- Infraestructuras de transporte por carretera, Autopista, Autovía, Carretera Nacional y Carretera Autonómica, a nivel Nacional.

Al **IGN** tuvimos que realizar una petición formal de información por la gran cantidad de hojas que representaba la obtención vía descarga web a escala 1:25.000 de las Pistas y Caminos de toda la zona de estudio. Así, nos proporcionaron esta información a nivel provincial de cada una de las 12 provincias implicadas.

## **6. METODOLOGÍA**

La metodología utilizada está basada en estudios similares realizados por el CEDER y en su intento de mejora, utilizando similares herramientas SIG pero de forma que los procesos nos acerquen lo máximo posible a la realidad del problema y así podamos crear el entorno de trabajo de transporte de Biomasa Forestal desde el lugar de elaboración hasta el centro de consumo.

### **6. 1. ANALISIS, MEJORA Y CARACTERIZACIÓN DE LA RED. OBTENCIÓN DE DATOS BASE**

Debido a las zonas de localización del producto y su elevada dispersión territorial, el principal método de transporte es la carretera. Se ha considerado transporte directo desde cargadero en campo hasta la central, sin parques intermedios.

La baja densidad del producto biomasa, y sobre todo de su escaso valor añadido, nos obliga a utilizar medios de transporte que gran capacidad. La biomasa forestal, previamente empacada, se transportará en un camión tráiler provisto de grúa forestal detrás del chasis para autocargarse (**Figura 4**). Puede transportar un máximo de 60 pacas cilíndricas de 2,5 m de largas por 0,6 de diámetro con un peso de entre 225 y 275 kg MS/paca en función de la densidad de la biomasa y de la compactación de las pacas. También transporta madera en rollo cortada a 2,5 m de largo hasta un máximo de unas 24 toneladas mediante este tipo de camiones.



Figura 4. Camión empleado en el transporte por carretera.

De esta manera, el camión irá hasta el cargadero del aprovechamiento o a pie de pista, lugar donde se ha reunido previamente la biomasa, cargará las pacas mediante su grúa y las transportará hasta el parque de la central en Miranda de Ebro.

### **1. Análisis de la información existente como Red de Transporte**

Partimos de la seguridad que nos proporcionan los investigadores del centro, de que la capa del *Open Street Map* es la más adecuada que podemos obtener de forma gratuita. No por este motivo deja de tener un nivel de detalle y calidad óptima para este trabajo. Es preciso realizar un análisis de esta capa a nivel de edición y de atributos que se otorgan a cada entidad a través de su tabla adjunta. Se analizará la cartografía digital del IGN y se valorará para su uso parcial en la red general de transporte, tanto como parte de la red, como posible fuente de mejora de la de *Open Street Map*.

### **2. Preparación y mejora de la Red**

Para la construcción de una red de transportes lo más precisa posible, y así poder hacer diferentes Análisis de Redes, será necesario llevar a cabo una serie de procesos y mejoras (Edición y Topología). En muchos casos de eliminación, edición, modificación y creación de líneas, así como la depuración de errores digitales y de atribución de características de tabla. Esta labor, de marcado carácter manual, hace que la automatización general de los procesos pueda dar lugar a posibles errores de magnitud difícilmente cuantificable en términos de resultado final de costes de transporte.

### **3. Caracterización de la Red de Transporte**

El análisis de redes, que deberemos llevar a campo para obtener la información base de costes por tonelada, es de suma importancia. Este análisis se basará en el uso de Impedancias de Transporte, que pueden ser de diferentes tipos:

- Impedancias de Longitud (metros): el parámetro que limita el movimiento al medio de transporte por la Red es la longitud. Una ruta mínima con esta impedancia proporcionará el camino de menor longitud geométrica. El uso de jerarquías es fundamental si hablamos de transporte por carreteras, ya que estas se basan en la velocidad y/o buen estado de conservación de la vía, lo que hace que la ruta óptima no siempre sea la más corta, sino la que en principio será más rápida por su mayor velocidad de circulación, y además será teóricamente más segura.

- Impedancias de Tiempo (minutos): el parámetro del que depende el movimiento o parámetro de coste es el tiempo que se tarda en desplazarse por la red. La ruta mínima no será la de menor longitud, sino que será por la que menos tiempo tardamos. Esta impedancia es mucho más adecuada que la anterior si hablamos de transporte en vehículos a motor con un coste horario reconocido. Además, la ruta óptima no dependerá de la jerarquía de red, ya que si la red está caracterizada por tiempos, estos serán los que determinen la ruta por encima de si la longitud es mayor o menor.
- Impedancias de Coste (€): también podemos utilizar el parámetro de coste, en términos monetarios, como parámetro de coste de movimiento a través de la red. Un ejemplo es en zonas donde los peajes son altamente significativos para el uso de autopistas y por lo tanto su influencia final es alta.

La metodología utilizada hasta la fecha se basa en el uso de impedancia **longitud**, la que nosotros hemos utilizado sólo para la comprobación de la efectividad de la red y del adecuado funcionamiento del uso de Jerarquías de Red. La validez de esta impedancia se basa en la estimación del coste en función de una única Velocidad Media, que se determina en 60 km/hora de transporte cargado y 80 km/hora de vuelta descargado, sin tener en cuenta las características de las carreteras atravesadas. Por lo tanto los costes del transporte por carretera serán similares siempre que la longitud sea igual, cosa poco probable en la realidad, y que en determinados casos puede corresponder a un error importante.

Es básico poder caracterizar la red de transporte de forma que se aproxime lo máximo posible a la realidad para decidir la **velocidad media de circulación** en función a estas características de tramo. Así, se proporcionarán mediante la tabla los siguientes atributos:

- Tipo de Carretera
- Enlace entre carreteras
- Rotondas en carreteras principales
- Zona urbana de velocidad limitada
- Zona industrial de velocidad limitada
- Grado de sinuosidad de la carretera
- Pendiente ascendente cargado

Estos atributos nos permiten conocer mejor la velocidad media de circulación de nuestro medio de transporte, lo que nos proporcionará la posibilidad de integrar estas velocidades en la tabla y obtener atributo de **Tiempo de Ida y Tiempo de Vuelta**. Estos tiempos se han diferenciado por



tramos que no superan el kilómetro de longitud, para una mayor precisión, lo que obligó a dividir toda la red en tramos de este tamaño.

#### 4. Integración de Pistas y Caminos en la red de carretera

El IGN nos ha proporcionado las capas de Pistas y Caminos de la zona de estudio hasta en tres tipos según el grado de actualización de las hojas a escala 1:25.000. Las hojas han sido agrupadas por provincias. Tras su unión y depuración se llevó a cabo la integración topológica con la red principal para lo que hubo que realizar procesos de edición que unieran las entidades de uno y otro tipo, usándose principalmente la herramienta *Alinear* y posteriormente *Planizar*, ambos procesos con los tipos de carretera adecuados seleccionados para no cometer errores de conexión. Uso de la herramienta *Alinear* nos obliga a hacer una revisión manual de las autopistas y autovías como se explicará en el siguiente apartado de *Procesos y Resultados*.

Debemos destacar que en los estudios previos no se han incluido este tipo de viales en formato vectorial real, se obtenía una distancia basada en un cálculo RASTER de distancia euclidiana entre el punto de elaboración de biomasa y la carretera más próxima, y un coeficiente de zig-zag que era función de la pendiente en la zona de extracción de la biomasa.

#### 5. Creación de Red y Líneas de Servicio

Una vez integradas pistas y caminos en la red de carreteras creamos la red y una primera capa de Líneas de Servicio que nos muestran las carreteras que no tienen conexión para excluirlas de la misma. Tras depurar la red se debe completar la tabla de atributos con tiempos de ida y tiempos de vuelta obteniendo la definitiva **Red de Transporte Camión** con la que crearemos la RED definitiva con todas las características necesarias de red y así poder obtener dos Líneas de Servicio mediante la herramienta Área de Servicio, una de las cuales deberá contener atributos de longitud, pero todas ellas serán calculadas con la impedancia de tiempo:

- Línea de Servicio de Tiempo de Ida: impedancia tiempo de ida y atributo tiempo de ida acumulado y longitud acumulada. Rotura de línea cada minuto.
- Línea de Servicio de Tiempo de Vuelta: impedancia tiempo de vuelta y atributo de tiempo de vuelta acumulado. Rotura de línea cada minuto.

Así, obtenemos dos capas de línea divididas en tramos que representan un minuto de distancia entre comienzo y fin de cada tramo, y es el tiempo mínimo en llegar desde la Central de Biomasa hasta cada uno de los tramos según la mejor ruta calculada por el sistema. Caracterizamos estos tramos con el atributo de tiempo acumulado al inicio y final del mismo, y en el caso de la capa de

tiempos de ida a por la biomasa también tenemos las longitudes. Estas dos capas se sumarán mediante una intersección, y obtendremos la capa de líneas con el tiempo total ida y vuelta y la longitud del recorrido de ida, será nuestra futura *capa fuente*.

## 6. 2. TRANSPORTE POR CAMPO Y CONEXIÓN DE DATOS. MAPA Y ECUACION DE COSTES

La segunda parte del proyecto aborda el problema del transporte de la biomasa, campo a través, desde cualquier punto de la superficie de la zona de estudio. Para entender mejor el por qué de este proceso debemos explicar brevemente el sistema de aprovechamiento utilizado. Este sistema de aprovechamiento de restos consiste en el empacado de ramas y copas para mejorar su transporte en cuanto a densidad y primera reunión del mismo.

Tras producirse el aprovechamiento maderero, un autocargador forestal con empacadora (**Figura 5**) se mueve a través de la zona de corta y va recogiendo los restos y los va empacando y depositando sobre el suelo en una primera y breve reunión de biomasa. Tras esta reunión un segundo autocargador (**Figura 6**) hace las labores de saca de la biomasa hasta cargadero (**Figura 7**) o hasta vía de acceso al camión.



Figura 5. Autocargador empacando

Hemos interpretado que estos cargaderos o puntos de conexión entre autocargador y camión no pueden corresponder a determinadas vías, siendo un claro ejemplo las autovías. A pesar de que tengamos biomasa cerca de una carretera no será posible conectar con camión sobre esta, habrá que transportarla hasta un punto donde se pueda hacer dicha operación. Las vías consideradas, donde el autocargador coincidirá con el camión, serán: *pistas y caminos, y vías de servicio*.



Figura 6. Saca autocargador



Figura 7. Cargadero

### 1. Movilidad del Autocargador. Superficie de Fricción

Como hemos mencionado con anterioridad, hemos buscado que la metodología nos aproxime lo máximo posible a la realidad. El nivel de escala del proyecto nos obliga a reducir los factores que inciden en los movimientos del autocargador al simple uso del Modelo Digital de Elevaciones. Estos movimientos están basados principalmente en las pendientes de la zona y en la velocidad de circulación media máxima que dependerá de dicha pendiente. Según nuestras experiencias la pendiente del terreno es el principal factor por lo que, partiendo del MDE, podemos obtener una superficie de fricción basada en el tiempo de desplazamiento a través de cada celda (**Tabla 1**). El método consiste en crear raster de pendientes (tamaño de celda 25x25), reclasificarlas por rangos dándoles el valor de coste o minutos, en este caso multiplicándolo por 10.000 para obtener rangos numéricos enteros más apropiados.

PENDIENTE (%)	VELOCIDAD (KM/H)	TIEMPO( MIN/METRO)	COSTE (x 10.000)
0 - 10	23	0,002608696	26
10 - 25	16	0,00375	38
25 - 45	12	0,005	50
45 - 65	8	0,0075	75
>65	2	0,03	300

Tabla 1. Tabla resumen de datos de superficie fricción

Esta superficie de fricción en minutos por metro será la utilizada como base para el cálculo de las siguientes capas raster de las herramientas **Distancia** dentro de las de **Análisis Espacial**. Para completar esta capa de fricción debemos introducir una particularidad que vuelve a aproximarnos un poco más a la realidad. Debemos de evitar que, en el cálculo de las futuras rutas de distancia mínima de coste a través de la capa de fricción, se creen rutas que atraviesen autovías o carreteras principales. El modo de conseguir esta particularidad ha sido mediante la conversión de líneas a raster y su posterior reclasificación a *NO DATA*.

### 2. Distancia de Coste o Tiempo del Autocargador. Coste de Autocargador

El uso directo de la herramienta **Distancia de Coste**, con la anterior capa de costes en minutos por metro, nos proporciona un raster donde cada celda muestra el mínimo valor acumulado, hasta llegar a la capa fuente, según los valores de coste de las celdas atravesadas hasta la capa fuente. Esta capa fuente en nuestro caso es la capa vectorial obtenida de las Líneas de Servicio y seleccionados y exportados sólo los tramos correspondientes a aquellas vías de conexión entre camión y autocargador, evitando que este acceda a descargar a carreteras principales, hechos que

nunca ocurren en la realidad, así como lo ya mencionado anteriormente sobre no atravesar carreteras al haber sido consideradas esas celdas como vacías o sin datos.

De esta manera obtenemos el tiempo en minutos de saca en autocargador que con el coste horario de autocargador ( $Cha = 76,25 \text{ €/h}$ ) y su rendimiento ( $7 \text{ Tm ms}$ ) por viaje a punto de descarga, usamos la calculadora raster para obtener la capa de costes de saca en autocargador.

$$\text{Coste}_{\text{autocargador}} (Ca) = T_{\text{autocargador}} * N_{\text{trayectos}} * Cha / (60 * Tn_{\text{ms}}_{\text{autocargador}})$$

$$\text{Coste}_{\text{autocargador}} (Ca) = T_{\text{autocargador}} * 0,36309$$

Donde:  $\text{Coste}_{\text{autocargador}}$ ; coste de autocargador en euros por tonelada de materia seca

$T_{\text{autocargador}}$ ; tiempo de autocargador en minutos

$N_{\text{trayectos}}$ ; número de trayectos para completar un porte, 2

$Cha$ ; Coste horario autocargador en euros por hora

$Tn_{\text{ms}}_{\text{autocargador}}$ ; Toneladas de materia seca que lleva el autocargador

### 3. Asignación de Tiempos de Camión. Costes de Camión

Basándose en el anterior cálculo de la ruta mínima de coste de autocargador, se le asigna a cada celda el valor de su correspondiente tramo de la capa fuente, obteniéndose así la suma de los minutos que tarda el camión en ir a ese tramo de la red y lo que tardará en volver cargado con biomasa. Con la calculadora raster se puede obtener esta información fácilmente en horas ( $T_{\text{rodando}}$ ) y luego hacer el cálculo de la ecuación para obtener el coste deseado.

El coste del camión se desglosa en dos partes, coste horario rodando ( $Chr = 54,95 \text{ €/h}$ ) y coste horario en terminal de carga y descarga ( $Cht = 44,82 \text{ €/h}$ ), con un rendimiento claramente superior al autocargador ( $16,25 \text{ Tn ms}$ ) por viaje a Miranda de Ebro, y un tiempo de carga y descarga prefijado ( $T_{\text{terminal}} = 1,76 \text{ h}$ ).

$$\text{Coste}_{\text{camión}} (Cca) = \text{Coste}_{\text{rodando}} (Cr) + \text{Coste}_{\text{terminal}} (Cte)$$

$$\text{Coste}_{\text{camión}} (Cca) = T_{\text{rodando}} * Chr / Tn_{\text{ms}}_{\text{camión}} + T_{\text{terminal}} * Cht / Tn_{\text{ms}}_{\text{camión}}$$

$$\text{Coste}_{\text{camión}} (Cca) = T_{\text{rodando}} * 3,382 + 4,854$$

Donde:  $\text{Coste}_{\text{camión}}$ ; coste de camión en euros por tonelada de materia seca

$T_{\text{rodando}}$ ; tiempo de camión circulando en horas

$Chr$ ; coste horario de camión rodando en euros por hora

$T_{\text{terminal}}$ ; tiempo de camión en terminal de carga y descarga en horas

$Cht$ ; coste horario de camión en terminal en euros por hora

$Tn_{\text{ms}}_{\text{camión}}$ ; Toneladas de materia seca que lleva el camión

#### 4. Asignación de Longitudes de Camión. Coste de Combustible

El coste del combustible es un parámetro que se ha medido de forma independiente debido a sus fluctuaciones, y no será función del tiempo si no de la distancia recorrida, siendo el coste por kilómetro de 0,42318182 euros.

Por lo tanto se creará una capa raster similar a la anterior que asigne a cada celda el valor correspondiente, según la capa de fricción, de distancia en kilómetros desde la central de Miranda de Ebro. Con la calculadora raster se crea el mapa de coste de combustible mediante la ecuación.

$$\text{Coste}_{\text{combustible}} (\text{Cco}) = D * 2 * \text{Cu} / \text{Tn ms}$$

$$\text{Coste}_{\text{combustible}} (\text{Cco}) = D * 0,05319$$

Donde:  $\text{Coste}_{\text{combustible}}$ ; coste de combustible en euros por tonelada de materia seca

D; distancia recorrida de ida hasta punto de recogida de biomasa

Cu; coste unitario de combustible por kilómetro

Tn ms <sub>camión</sub>; Toneladas de materia seca que lleva el camión

#### 5. Coste total de Transporte por Tm de Biomasa

Una vez calculados todos los costes parciales se pueden sumar mediante la calculadora raster, pero también habría sido posible usar esta herramienta de forma directa, desde los mapas de tiempos y distancia, para calcular el raster final.

$$\text{Coste}_{\text{total}} (\text{Ct}) = \text{Coste}_{\text{camión}} (\text{Cca}) + \text{Coste}_{\text{autocargador}} (\text{Ca}) + \text{Coste}_{\text{combustible}} (\text{Cco})$$

$$\text{Coste}_{\text{total}} (\text{Ct}) = T_{\text{rodando}} * 3,382 + T_{\text{autocargador}} * 0,36309 + D * 0,05319 + 4,854$$

Donde:  $\text{Coste}_{\text{total}}$ ; coste total de transportar 1 Tn de ms de biomasa desde punto origen a central

$T_{\text{rodando}}$ ; tiempo de camión circulando en horas ida y vuelta

$T_{\text{autocargador}}$ ; tiempo de autocargador en minutos por trayecto, ida o vuelta

D; distancia recorrida de ida hasta punto de recogida de biomasa o cargadero

## 7. PROCESOS Y RESULTADOS

### 7 1. PROCESOS PARA LA CREACIÓN DE LA RED DE CARRETERAS PRINCIPALES

La capa inicial, obtenida de **Open Street Map**, presentaba numerosos tipos de vías (**Figura 8**), desde autopistas hasta sendas de montaña, pasando por diferentes categorías y tipos de carreteras, además de otras infraestructuras lineales como carriles para bicicletas o vías ferroviarias. Se han analizado los tipos de carretera y se han seleccionado los que nos interesan

por su transitabilidad y uso, a priori en nuestro proyecto, exportando estas entidades en una nueva capa (**Figura 9**).

Esta **valoración de vías aptas**, como muchas otras que se realizarán durante todo el proyecto, se han realizado mediante la visualización de fotografías aéreas mediante el servicio de **ArcGis Online**, añadiendo el mapa base fotografías aéreas.

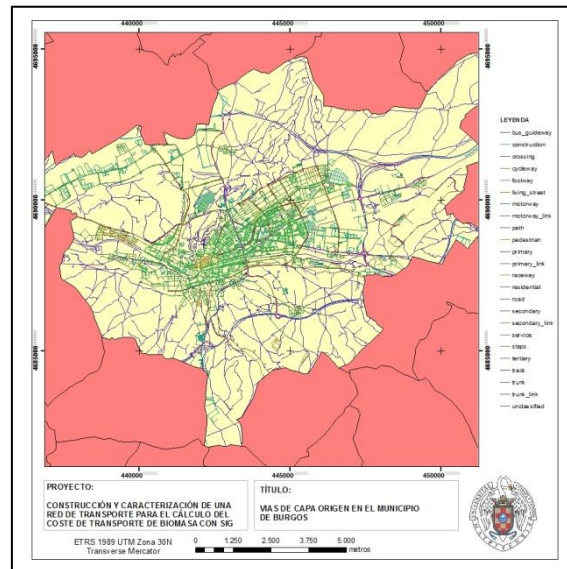


Figura 8. Vías originales, Burgos (Castilla y León). Elaboración propia

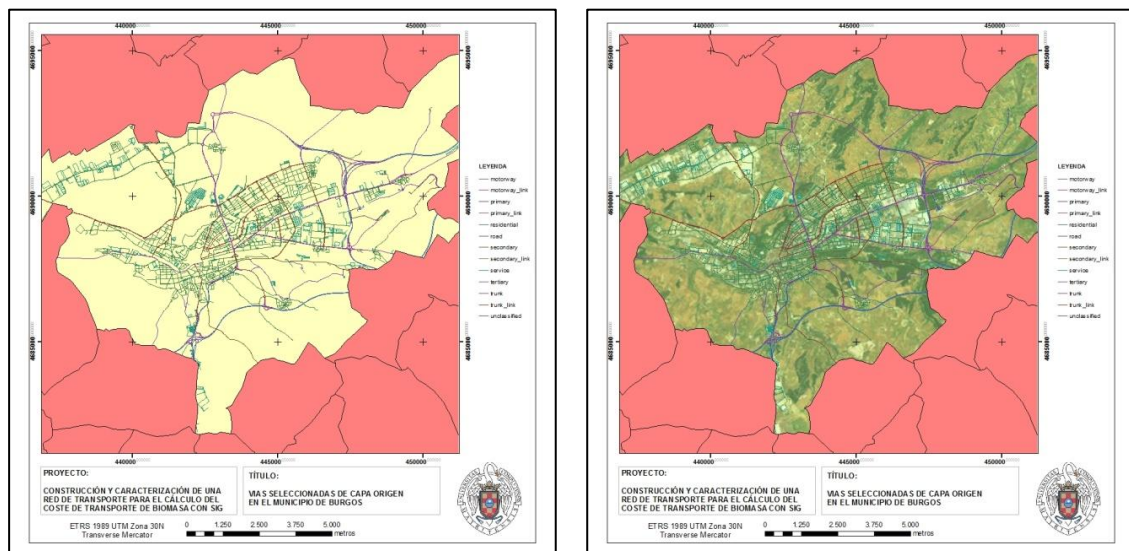


Figura 9. Vías seleccionadas, Burgos (Castilla y León). Elaboración propia

Este proceso de análisis y selección de los tipos de vías se hace desde la categorización existente en la **tabla de atributos (Figura 10)** de la capa. En esta destaca la existencia de tres atributos básicos para la construcción de una red de transporte adecuada que nos permita hacer un análisis de red lo más preciso posible en cuanto a características de movilidad interna.



FID	Shape *	osm_id	name	ref	type	oneway	bridge	tunnel	maxspeed
0	Polyline	1660091	Avenida de Cantabria	N-627	trunk	1	0	0	0
1	Polyline	1660092	Circunvalación de Burgos	BU-30	motorway	1	0	0	0
2	Polyline	1660092	Circunvalación de Burgos	BU-30	motorway	1	0	0	0
3	Polyline	1660092	Nudo Landa		motorway_link	1	0	0	0
4	Polyline	1660092	Nudo Landa		motorway_link	1	1	0	0
5	Polyline	1660092	Nudo Landa		motorway_link	1	0	0	0
6	Polyline	1660093	Nudo Landa		motorway_link	1	0	0	0
7	Polyline	1660093	Nudo Landa		motorway_link	1	0	0	0
8	Polyline	1660093	Autovía del Norte	A-1	motorway	1	1	0	0
9	Polyline	1660094	Circunvalación de Burgos	BU-30	motorway	1	1	0	0
10	Polyline	1660094	Circunvalación de Burgos	BU-30	motorway	1	0	0	0
11	Polyline	1660095	Circunvalación de Burgos	BU-30	motorway	1	1	0	0
12	Polyline	1660095	Circunvalación de Burgos	BU-30	motorway	1	0	0	0
13	Polyline	2322510	Circunvalación de Burgos	BU-30	motorway	1	0	0	0
14	Polyline	2322536	Autovía del Norte	BU-30	motorway	1	0	0	0
15	Polyline	2323558	Autovía del Norte	BU-30	motorway	1	0	0	0
16	Polyline	2323558	Autovía del Norte	A-1	motorway	1	0	0	0

Figura 10. Tabla de atributos capa origen.

Atributo “**type**” (tipo de vía), catorce tipos que formaran la capa red de carreteras principales:

- Motorway: autopistas y autovías, aparecen divididas según el doble eje de vía que las caracteriza, y todas con el atributo “oneway” de sentido único.
- Motorway link: tramos enlace de autopistas y autovías, atributo “oneway” siempre.
- Trunk: carretera de primer orden, similares a carreteras nacionales del IGN.
- Trunk link: tramos enlace de carreteras de primer orden.
- Primary: carreteras de segundo orden, principales carreteras autonómicas.
- Primary link: tramos enlace de carreteras de segundo orden.
- Secondary: carreteras de tercer orden, secundarias en importancia de las autonómicas.
- Secondary link: tramos enlace de carreteras de tercer orden.
- Tertiary: carreteras de cuarto orden, o terciarias en importancia de las autonómicas.
- Tertiary link: tramos enlace de carreteras de cuarto orden.
- Residential: calles urbanas de diferente orden, importantes al suponer, sobre todo en localidades rurales, el enlace a caminos y pistas forestales.
- Service: pequeñas vías de servicio que pueden suponer enlace entre carreteras y caminos, así como zonas de carga y descarga de biomasa.
- Road: pequeñas carreteras de servicio o acceso a determinadas zonas, existen pocas en la zona de estudio, pero algunas pueden ser importantes.
- Unclassified: mezcla de carreteras de servicio, de acceso a fincas, pistas asfaltadas, similar al tipo anterior. Son vías difíciles de clasificar, pero muchas aparecen en ámbitos rurales, por lo que las consideraremos importantes.

Atributo “**oneway**” (sentido único), este atributo indica que vías son de un solo sentido de circulación, su contenido deberá ser cambiado por FT (*From-To*) ya que prácticamente la totalidad de vías con este atributo están editadas en el sentido de la circulación.

Atributos **“bridge”** (puente) y **“tunnel”** (túnel), estos dos atributos proporcionan a la capa un carácter claramente funcional en cuanto a la realización de análisis de redes ya que van a suponer la restricción de acceso entre vías que se superponen pero que no interceptan. Vías que no presentan cruce de unión, las rutas se pueden acercar aún más a la realidad. Las capas del IGN no presentan estas características. La **Figura 11** muestra la imagen aérea donde se superponen una autovía con una carretera autonómica de tercer orden. Esta carretera autonómica presenta un tramo caracterizada como túnel que deberá permanecer tal y como está, sin intersecciones que unan ese vector con el situado por encima que es una autovía con la que no enlaza en este punto.



Figura 11. Ejemplo de la importancia de los atributos túnel y puente. Elaboración propia

### **Principales ventajas y desventajas en el uso de *Open Street Map***

Esta capa ha sido comprobada en análisis de red en cuanto a su correcta edición del campo sentido único o *oneway* y está definida correctamente. El doble eje en autovías y autopistas también da idea de la precisa digitalización con la que se ha editado y que se comprueba con las fotografías aéreas. Al contrario que la cartografía del IGN donde existen algunos fallos de edición grave, y en general poca precisión en los trazados. Los tramos puente y tramos túnel indica también la elaboración de *Open Street Map* pensando en su posible uso en análisis de red.

Como principal desventaja tenemos la complejidad en el uso de las vías consideradas como caminos y pistas. Su existencia es muy heterogénea, con zonas totalmente representadas y otras en las que no aparece ninguna. Además, a estos niveles es complicado diferenciar la tipología de camino o pista y sus numerosas posibilidades, lo que ya comprobamos en otros tipos de vías asfaltadas cuando dejan de ser carreteras claramente diferenciadas. Por lo tanto se decide no usar estas.



EL primer proceso al que debemos someter a la red de vías seleccionada es dividir líneas en intersecciones con la herramienta topológica **Planarizar Líneas**. Este proceso sirve para dividir carreteras en tantos tramos como intersecciones con otras carretera contenga (**Figura 12**).

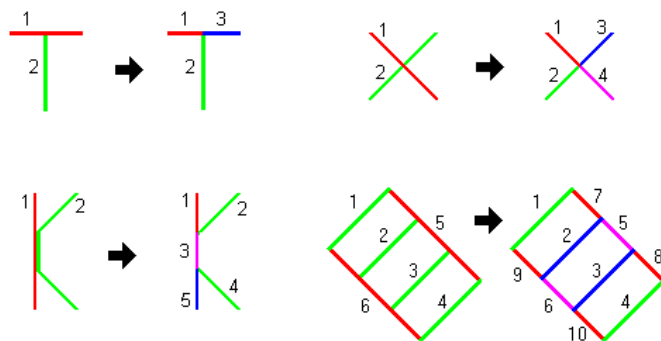


Figura 12. Esquema de funcionamiento de planarizar líneas

Fuente: resources.arcgis.com



Las líneas que se desean dividir en intersecciones deben tener su edición abierta y ser seleccionadas. Este proceso si se hace para todo el conjunto de la capa crearía intersecciones en los cruces de puentes y túneles, eliminando esta propiedad de red. Por lo tanto la selección de líneas a planarizar no debe incluir los túneles y puentes, selección por atributos.

Al realizar las primeras redes y comprobaciones de zonas sin conexión, mediante la creación de líneas de servicio dentro de la herramienta de análisis de red Áreas de Servicio, se vieron algunas zonas (**Figura 13**) en la que el acceso, en este caso a una urbanización, se hace mediante un tramo puente desde una rotonda. En esta no se ha creado el nodo necesario para acceder a ese tramo puente al no ser seleccionado al planarizar.

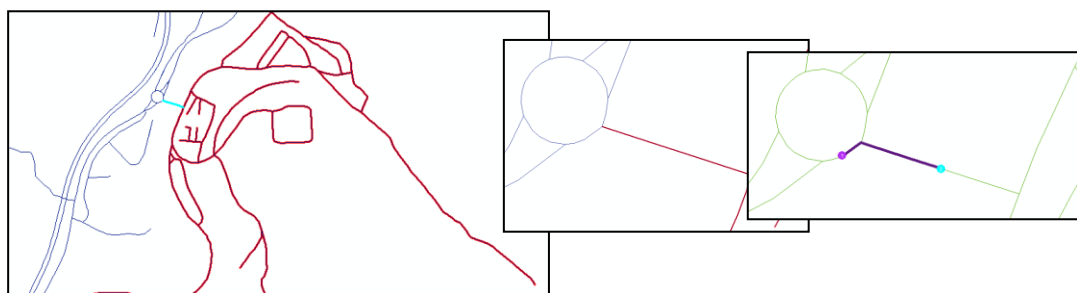


Figura 13. Fallo de planarizado. Detalle zona sin conexión y arreglo. Elaboración propia

Para evitar estos casos se decide planarizar mediante el siguiente procedimiento (**Figura 14**):

- 1.- Seleccionar de la red los puentes y túneles y exportarlos como capa futura a fusionar (**Merge**).
- 2.- Editar la capa, seleccionamos todo y planarizar.
- 3.- Tras planarizar todo se cierra la edición, se seleccionan los tramos puente y túnel y se vuelve a editar para eliminar estos tramos puentes y túnel que se han planarizado y partido.
- 4.- Por último se hace fusión entre esta capa red y la de túneles y puentes enteros y se comprueba creando de nuevo la red.

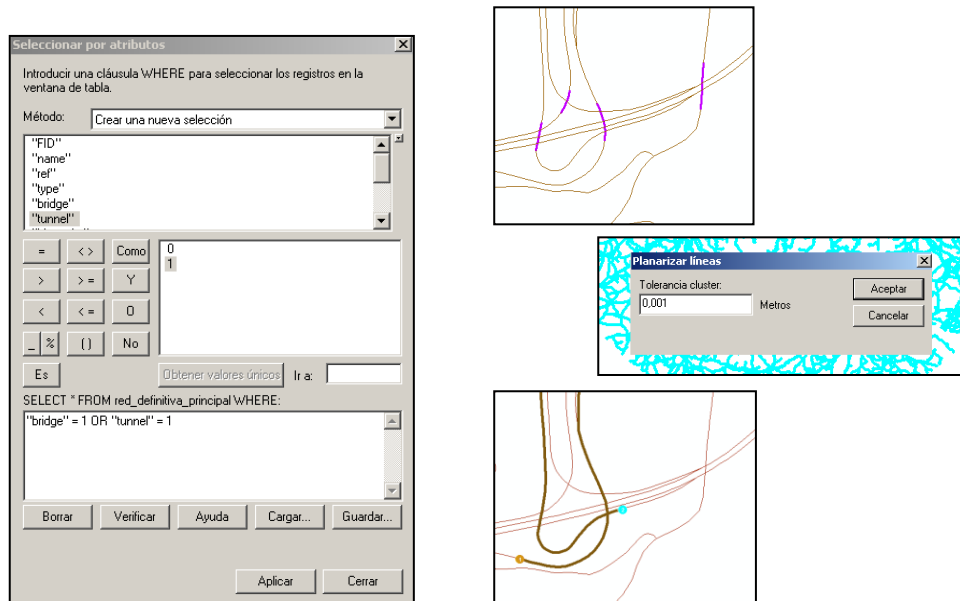


Figura 14. Diferentes etapas del proceso de planarizado. Elaboración propia

Una nueva comprobación de zonas sin conexión vuelve a mostrarnos un problema de planarizado en rotondas con la característica de puente, rotondas que están situadas sobre autopistas y autovías (**Figura 15**). En estos casos no se puede utilizar un procedimiento automático, por lo que se realizó una selección de los puentes y túneles que interceptan con autopistas y autovías (tipo *motorway*) para su mejor localización visual, y se realiza una selección manual de las líneas a dividir creándose nodos de intersección al planarizar.

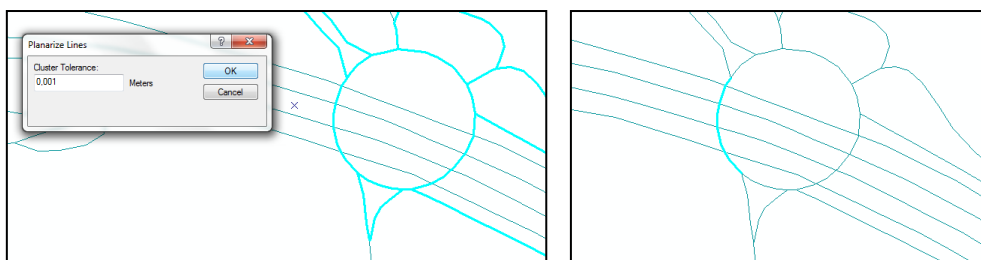


Figura 15. Detalle de planarizado manual en rotondas puente ó túnel. Elaboración propia

Tras solucionar las zonas no conectadas por la inexistencia de nodos de intersección al planarizar, seguimos viendo que existen zonas aisladas. Estas zonas se exportan como capa y se hace una selección por localización de los tramos que, interceptando con la red, evitan que se conecte a esta. De esta manera vemos que existen hasta 5 errores de digitalización de tramos con atributo *ONEWAY* (**Figura 16**) en la que se debe cambiar el atributo *FT* por *TF*, ya que el sentido de la circulación es contrario al de digitalización.

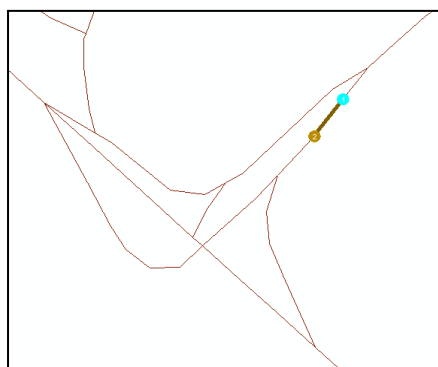


Figura 16. Tramo erróneo. Oneway = TF

FID	Shape	name	ref	type	bridge	tunnel	hierarchy	oneway	ACCESO
97960	Pollinea	Quinta	tertiary		0	0	3	TF	Quintanilla
3	Pollinea		primary		0	1	2	FT	Donostia
4	Pollinea		primary		0	1	2	FT	Pollnoria
5	Pollinea		primary		1	0	2	FT	Bilbao
7	Pollinea		primary		1	0	2	FT	Bilbao
8	Pollinea		primary		1	0	2	FT	Bilbao
9	Pollinea		primary		1	0	2	FT	Bilbao
10	Pollinea		primary		1	0	2	FT	Centro Co

Tras estas modificaciones se vuelve a crear una red y las líneas de servicio. Esta muestra ya una conexión total entre líneas que se interceptan físicamente, quedando pocas líneas sin conexión, todas ellas por estar separadas de la red (**Figura 17**). Tras visualizar la tabla de atributos y los tipos de tramos aislados se decide quitarlos. Ninguno de estos tramos es principal ni afecta en gran medida a poblaciones enlace de enlace a pistas, la mayoría son tramos residenciales de ciudades grandes, se decide eliminar todos excepto uno (**Figura 18**) que se arregla de forma manual por su, a priori, importancia como vía.



**Seleccionar por Localización**

Seleccione entidades de una o más capas de destino en base a su ubicación en relación a las entidades en la capa fuente.

Método de selección:  
seleccionar entidades de

Capas de destino:

- ☐ Miranda\_de\_Ebro
- ☐ red\_servicio2\_sin\_oneway
- ☒ red\_SER\_DIV\_prueba3
- ☒ Nueva capa de grupo
  - ☐ AUTOPISTA
  - ☐ AUTOVIA
  - ☐ CARR\_AUTON
  - ☐ CARR\_NAC
  - ☐ ENLACE
  - ☐ PISTA
  - ☐ OTRAS\_VIAS

☐ Mostrar sólo capas seleccionables en la lista

Capa fuente:  
red\_servicio2\_sin\_oneway

☐ Utilizar entidades seleccionadas (0 de entidades seleccionadas)

Método de selección espacial:  
Las entidades de las capas de destino intersecan la entidad de la capa fuer

☐ Aplicar una distancia de búsqueda  
1,000000 Metros

Ayuda Aceptar Aplicar Cerrar

Figura 18. Vía importante conectada manualmente y Figura 17. Comprobación no interceptan. Elaboración propia

En un intento de caracterizar todas las carreteras principales con el nombre de la vía y comprobar la correcta categoría de las vías de *Open Street Map*, se realizaron numerosas búsquedas mediante **selección por localización** entre esta capa y las capas del IGN, así como **unión espacial** de ambas capas para transferir, del IGN a *Open Street Map*, el nombre de la vía. También se transfirió la condición de Peaje en las autopistas.

El principal resultado de este proceso fue la observación de la existencia de carreteras autonómicas que no aparecen en nuestra capa base. Tras comprobar que algunas de ellas son erróneas se decide hacer la comprobación visual de todas y su edición lo más acertada posible mediante la superposición de fotografía aérea. Estas carreteras pueden suponer importantes accesos en zonas rurales y futuras intersecciones con caminos del IGN. Finalmente se incluyen un total de 427 tramos de carretera con un total de 577,67 kilómetros. A estas carreteras se les asignará el tipo *Tertiary* de la tabla de atributos.

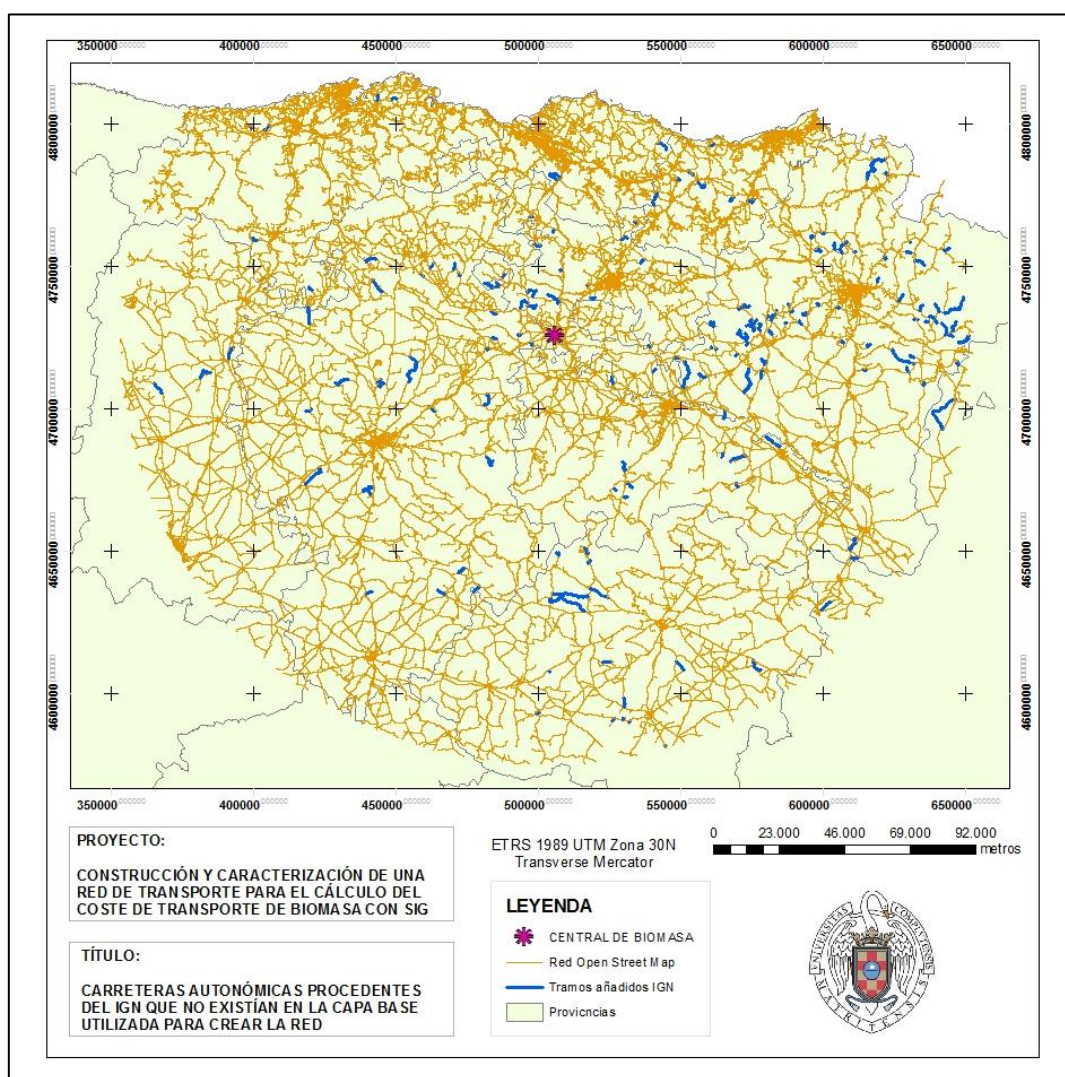


Figura 19. Carreteras autonómicas añadidas. Elaboración propia

## 7 2. PROCESOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA RED DE CARRETERAS PRINCIPALES

Una vez que tenemos una capa base con la que construir una red de análisis adecuada, debemos caracterizar esta capa para darle atributos reales a cada tramo que nos ayuden a decidir la velocidad media de circulación de nuestro camión de transporte de biomasa. Ya tenemos una primera característica con el **tipo de vía**, y también si es un **tramo enlace** o no, dentro de cada tipo de vía. Estos tramos están completamente caracterizados en el caso de las autopistas y autovías (*motorways*) pero no es así en el caso de carreteras nacionales y autonómicas (*trunk, primary, secondary, tertiary*). En estos tipos de vías existen tramos que, sin ser caracterizados con el sufijo “\_link”, son claramente puntos de menor velocidad por ser tramos de enlace entre carreteras.

En el caso de carreteras nacionales (*trunk*) y algunas autonómicas (*primary* y *secondary*) se han revisado manualmente todos los tramos enlace, creándose un nuevo atributo “**TRAMO\_ENLACE**” que con valor 1 supone un tramo enlace y con valor 2 tramo enlace rotonda. De esta forma se hace una importante y costosa labor al caracterizar numerosas rotondas, antes no designadas como enlace, que supondrán un descenso de la velocidad de circulación.

Con la caracterización de estas rotondas hemos obtenido también un aumento en la **restricción ONEWAY**. Suponiendo que la digitalización de todas las rotondas se ha realizado en el sentido de la circulación (anti-horario), al dar el atributo *ONEWAY = FT* en estas rotondas, se debería de respetar el sentido correcto de movimiento en las rotondas (**Figura 20**). Se han realizado un total de 12 comprobaciones, todas correctas.

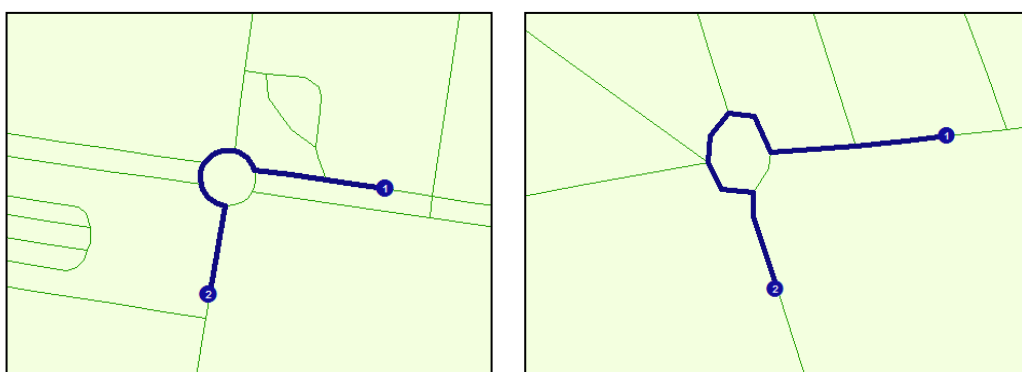


Figura 20. Rotondas caracterizadas como tal. Elaboración propia

Se han diferenciado las rotondas de carreteras autonómicas (*trunk*) y las principales autonómicas (*primary*) por ser las que más importancia de uso tendrá en largas distancias al ser superiores en el orden jerárquico y con velocidad media de circulación mayor que en las otras.



Otra característica importante a tener en cuenta es el **carácter urbano** de muchos tramos de carretera, tanto carreteras nacionales como autonómicas. Así, obviando las autovías y autopistas, se han cruzado las carreteras nacionales y las autonómicas con la capa de núcleos urbanos y la de zonas industriales del IGN, a la que se ha aplicado un **buffer** de 70 metros. Con la herramienta **Identidad** conseguimos añadir los atributos de estas superficies a los tramos de la red sobre los que influye.

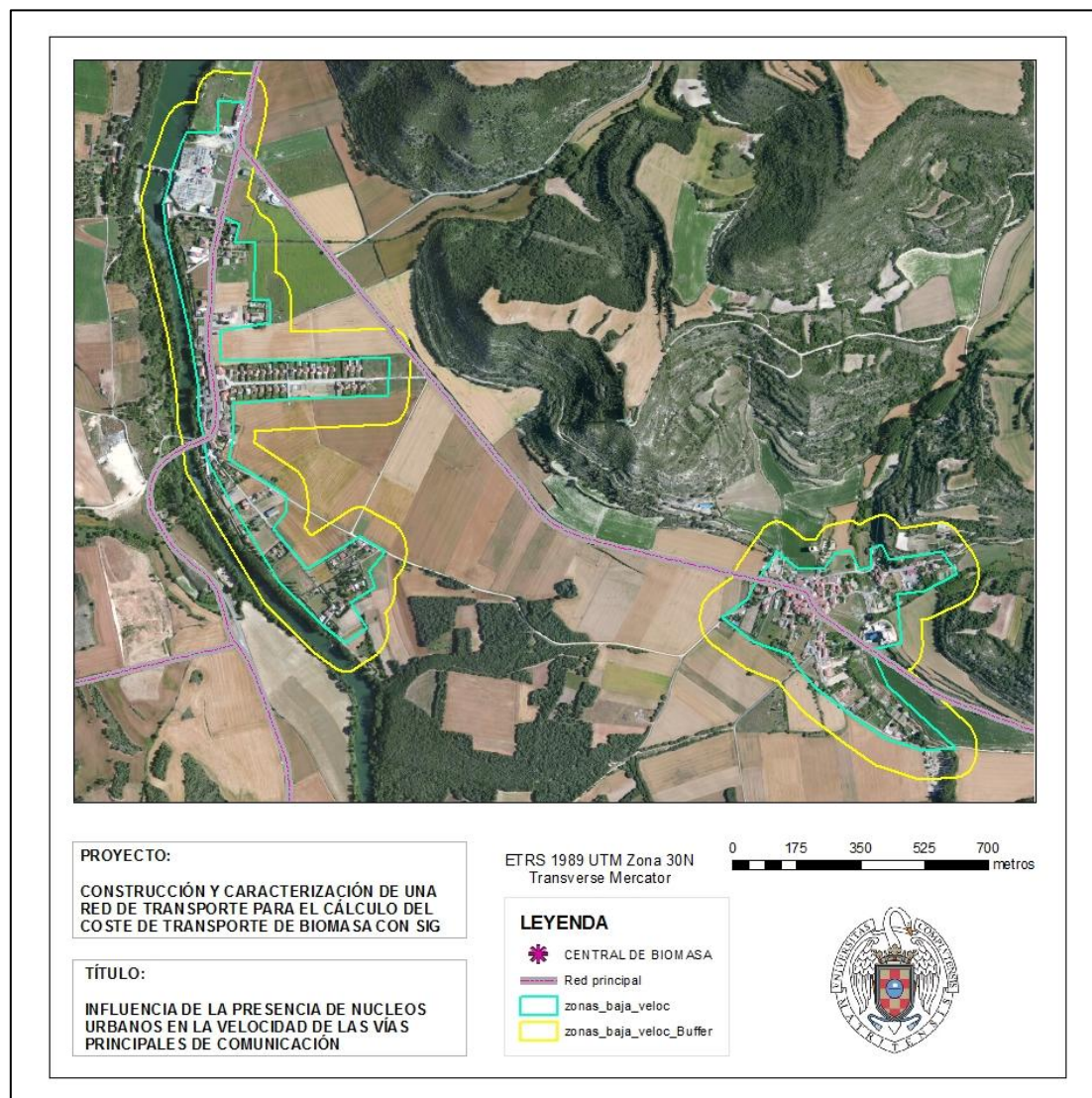


Figura 21. Detalle de influencia de zonas urbanas. Elaboración propia

Así se han caracterizado un total de 5.058,94 kilómetros de carretera como de baja velocidad, debido a que atraviesa zonas urbanas e industriales de velocidad reducida. Nos aseguramos un acercamiento a la realidad del transporte por carretera en cumplimiento con la ley de tráfico y de prevención de riesgos laborales en trabajos de conducción de vehículos pesados.

Las **características geométricas** de las vías en el eje *X* e *Y* suponen un condicionante importante de la velocidad de circulación, nos referimos al **grado de curvatura** de la vía y a la **pendiente ascendente** de las mismas. Antes de realizar este proceso se debe dividir la red en tramos de un tamaño tal que pueda ser caracterizado con la mayor precisión posible como tramo curvo o con el que se pueda hacer un cálculo acertado de pendiente. El software ArcGis 10.1 no presenta un modo de división de líneas automático y masivo, por lo que la correcta ejecución de este proceso se podía hacer costosa en lo que ha tiempo y calidad se refiere.

Finalmente es un proceso propio de Análisis de Red el que nos servirá para dividir nuestra capa red en tramos de 1 kilómetro (**Figura 22**). Tras crear la red se hace un área de servicio creando Líneas de Servicio divididas en tramos de 1000 metros. Esta capa se cruza, con la herramienta *Identidad*, con la capa red y cada uno de los tramos obtenidos será caracterizado según su curvatura y pendiente ascendente es significativa o no.



Figura 22. Creación de líneas de servicio divididas

Ambas características se han definido sólo en carreteras nacionales y autonómicas, con procesos de diferente complejidad.

### GRADO DE CURVATURA O SINUOSIDAD

La presencia de curvas en las carreteras, según las opiniones recogidas, es el mayor condicionante para la reducción de la velocidad de circulación de un camión. La herramienta que vamos a usar para este fin pertenece a las de Análisis Espacial de Densidad, **Densidad de Líneas**.

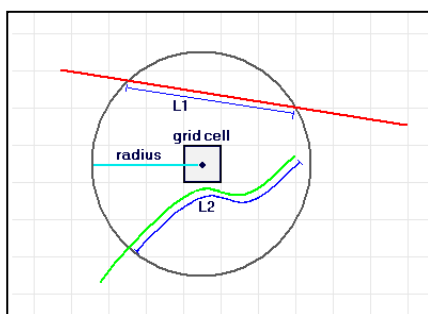


Figura 23. Fuente: resources.arcgis.com

Calcula una magnitud por unidad de área a partir de entidades de polilínea que caen dentro de un radio alrededor de cada celda (**Figura 23**).

$$\text{Densidad} = ((L1 * V1) + (L2 * V2)) / (\text{área del círculo})$$

En la aplicación de esta herramienta existe el problema de la presencia de líneas agrupadas en una zona siendo de diferentes vías, y no son realmente una curva. Este problema se agrava principalmente en los cruces de carreteras.

Para evitar que los tramos que pegan con intersecciones con otras vías, rotondas, enlaces, etc, se puedan ver caracterizadas como zonas de curvas por la densidad mayor de líneas, se va a proceder a seleccionar los tramos que interceptan con nodos de inicio o fin de entidad. Muchos tramos son enlaces “\_link”, y ya tendrán velocidad reducida. Para reducir el número de nodos a sólo los existentes en cruces y no en cada fin y comienzo de tramo vamos a hacer una Disolución (Figura 24.1) de entidades por un campo común y sin crear multipartes, y obtendremos una capa con tramos enteros (Figura 24.2) que al crear la red con las herramientas de análisis de redes, nos proporcionará una capa de puntos o nodos que servirán para encontrar automáticamente, con Selección por Localización los tramos, los tramos que interceptan con los nodos. Se seleccionan los que interceptan con los nodos a distancia de 100 metros (Figura 24.3), distancia posterior de cálculo de densidad de línea. Por lo tanto lo que coja para calcular la densidad de línea es seguro de su misma vía a no ser que presente una línea paralela. Las líneas seleccionadas se borran (Figura 24.4).

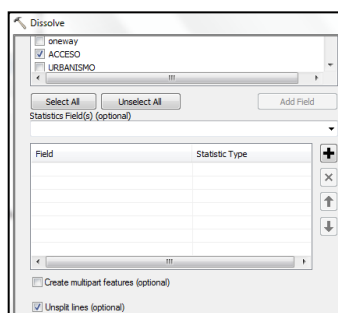


Figura 24.1. Tramos intersecciones  
Disolución

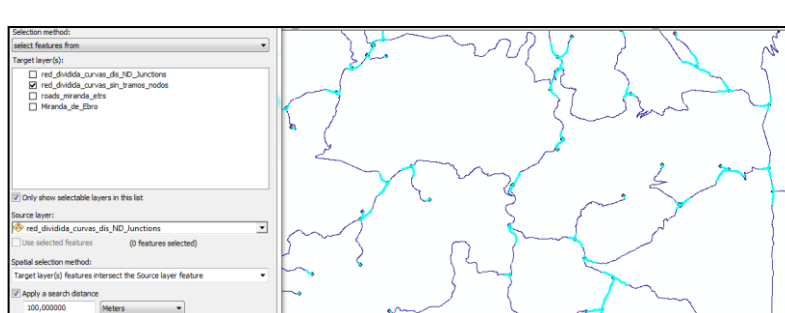


Figura 24.3. Tramos intersecciones  
Selección

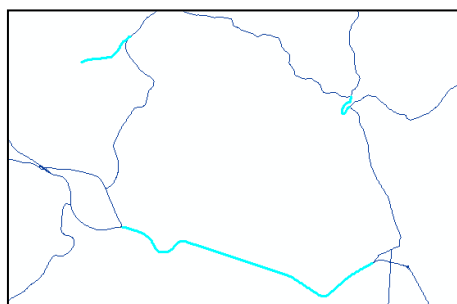


Figura 24.2. Tramos intersecciones  
Tramos enteros para nodos intersección

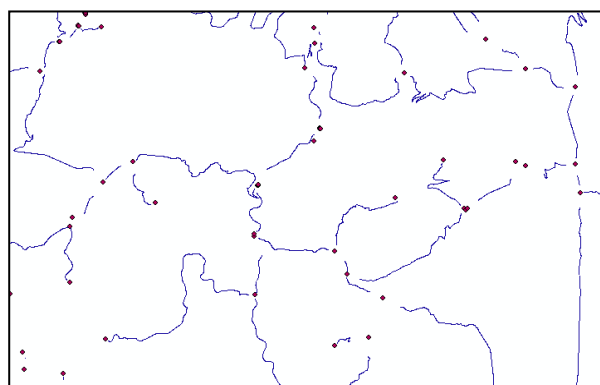


Figura 24.4. Tramos intersecciones  
Eliminación líneas tramo intersección

Elaboración propia



Obtenido la capa a la que aplicar Densidad de Líneas se hace el proceso con un radio de cálculo de área de 100 metros de radio (**Figura 25.1**).

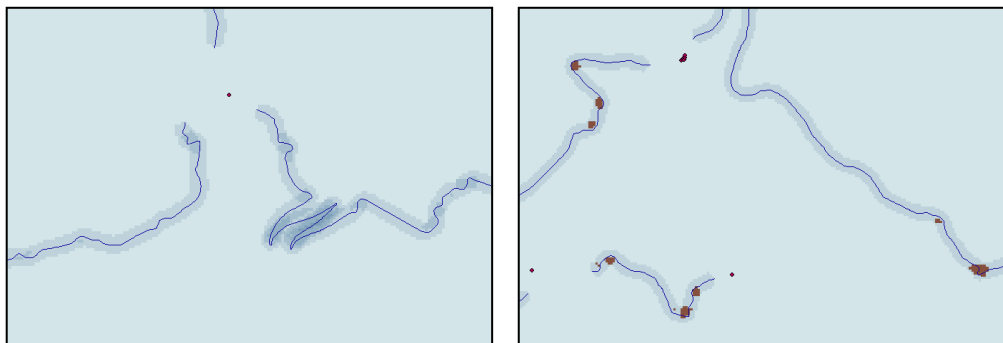


Figura 25.1: Densidad de Líneas. Elaboración propia. Figura 25.2: Reclasificado. Elaboración propia.

Tras varias comprobaciones y pruebas visuales se decide establecer los siguientes límites de caracterización de curvatura significativa de descenso de velocidad; **Grado 1:**  $0,7 - 1,0 \text{ m}^2/\text{área}$ ; **Grado 2:**  $> 1,0 \text{ m}^2/\text{área}$ . Reclassificando el raster según estos valores (**Figura 25.2**).

Para añadir la información raster clasificada de curvas a la capa vectorial dividida hacemos un Estadística Zonal como Tabla (**Figura 26**), buscando obtener el valor máximo, por lo que si un tramo tiene el valor 2 será de sinuosidad 2, y si tiene algún valor 1 será nivel 1.

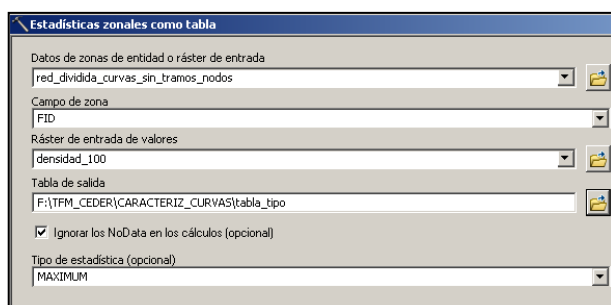


Figura 26: Estadística Zonal Tabla

Ahora se debe hacer una unión de tablas por el campo FID y agregar un campo de *Sinuosidad* y copiar el valor de *máximo*, obteniendo el atributo Grado de Curvatura deseado. De los 48.252 tramos iniciales de carreteras principales no autovías y sin nodos, tenemos 8.437 tramos caracterizados, 5.767 con valor 1 (2.822,7 kms) y 2.670 tramos con valor 2 (1.356,2 kms).

#### PENDIENTE ASCENDENTE DE VUELTA A CENTRAL

Se ha querido diferenciar únicamente los tramos de carretera que serán ascendentes en el sentido de vuelta por ser en esta situación en la que el vehículo va cargado y limitado por el peso de la biomasa. El proceso elegido para hacerlo, tras valorar otros, ha sido el siguiente.

1.- Se hace una Identidad entre la capa red general terminada y la capa dividida de carreteras a caracterizar (nacionales y autonómicas) para obtener la primera dividida en tramos. Con esta capa se crea una red con el principal objetivo de obtener la capa nodos.

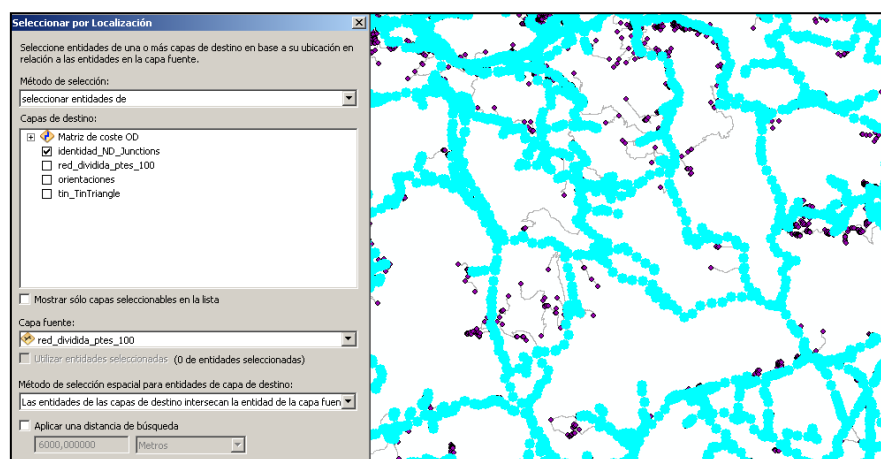


Figura 27. Selección de los nodos de interés. Elaboración propia

Los nodos que nos interesan son los que forman el inicio y/o fin de los tramos de las carreteras a caracterizar, por lo que se hace una Selección por Localización de los nodos que interceptan con carreteras nacionales y autonómicas (**Figura 27**) y exportamos estos como otra capa.

2.- Con la red creada anteriormente hacemos una **Matriz de Coste** entre el punto donde se sitúa la central de biomasa en Miranda de Ebro y la capa de nodos. Se genera una tabla con las distancias a cada punto destino o nodo, con un atributo **DESTINATION\_ID** que es igual a **FID + 1** de la tabla nodos. Vamos a crear un campo que sea eso, **FID + 1** en la capa nodos, para luego hacer la **Unión de Tablas** (**Figura 28**) y saber la distancia a cada nodo. Después, a la capa de nodos, ya con la distancia de red a la central, le agregamos la cota Z con la herramienta de la caja de Análisis 3D de **Añadir Información de Superficie**. Tras esto tenemos la distancia y la cota de cada punto.

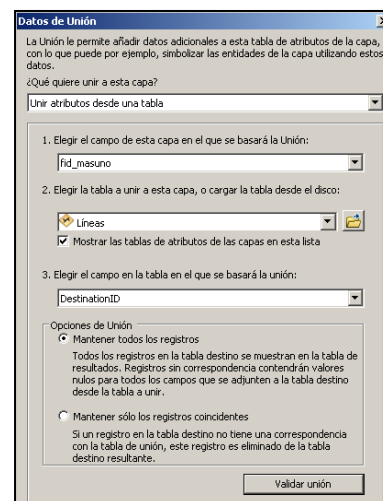


Figura 28. Unión de tablas

3.- Ahora hacemos una **Unión Espacial** (**Figura 29**) entre la red que queremos caracterizar y los nodos, debemos hacer que se unan a cada tramo los dos nodos de comienzo y de fin. Conseguimos así que cada tramo tenga asignado dos entidades de la tabla nodos, una con cada valor de nodo con el que intercepta. Debemos destacar que se crea un campo con atributo doble

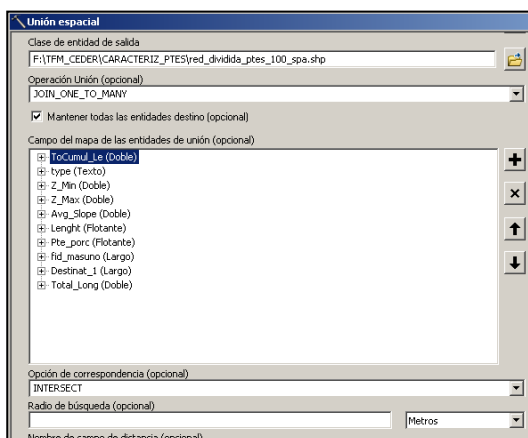


Figura 29. Unión de Tablas. Elaboración propia

o repetido. Representa cada uno de los dos nodos que se han unido a un tramo, se denomina por defecto **TARGET\_FID** (Figura 30).

FID	Shape	TARGET_FID	JOIN_FID	ToCumul_Le	Length	fid_masuno	Destinat_1	Total Long	Z
0	Polyline M	0	32109	1563,189078	100,263	32110	5	1563,813924	491,774369
1	Polyline M	0	32141	1563,189078	100,263	32142	4	1463,510735	493,15709
2	Polyline M	1	32057	1718,812966	130,02901	32058	8	1719,499861	489,925306
3	Polyline M	1	32109	1718,812966	130,02901	32101	6	1588,419027	492,511947
4	Polyline M	2	32018	1891,858991	173,04601	32019	11	1892,615271	487,955709
5	Polyline M	2	32057	1891,858991	173,04601	32058	8	1719,499861	489,925306
6	Polyline M	3	31918	2179,233791	119,252	31919	21	2180,104651	484,442053
7	Polyline M	3	31967	2179,233791	119,252	31968	16	2060,805378	491,167004
8	Polyline M	4	31779	2587,80358	267,39099	31780	30	2588,83785	492,912487
9	Polyline M	4	31883	2587,80358	267,39099	31884	24	2321,339953	482,755532
10	Polyline M	5	31740	2693,561584	105,758	31741	40	2818,065378	501,204692
11	Polyline M	5	31779	2693,561584	105,758	31780	30	2588,83785	492,912487
12	Polyline M	6	31628	3000	191,282	31629	48	3001,186334	502,010304
13	Polyline M	6	31697	3000	191,282	31698	39	2809,840233	496,093447
14	Polyline M	7	31230	4000	993,42297	31231	82	4001,596893	497,889307
15	Polyline M	7	31628	4000	993,42297	31629	53	3007,77683	501,951229

Figura 30. Detalle de tabla tras Unión Espacial. Elaboración propia

4.- Hacemos ahora una Disolución de entidades por el campo **TARGET\_FID** sacando las estadísticas de campo PRIMERO y ÚLTIMO del campo de longitud total de red desde la central y de cota Z.

5.- Por último agregamos un campo en el que se añade el siguiente cálculo con la calculadora de campos: “Primera Longitud” – “Última Longitud” \* “Primera Z” – “Última Z” (Figura 31). El valor del campo es irrelevante, lo que nos interesa es el signo ya que los negativos muestran que desciende al ir desde la central hacia fuera y los positivos ascienden. Lo que nos interesan los **signos negativos**, que muestran que los camiones ascienden a la vuelta cargados. Así tendremos caracterizada esta capa de tramos de carretera, luego se le añadirán las velocidades según su pendiente unitaria media, calculada mediante longitud y cota máxima y mínima como un campo aparte. Un total de 3.009,30 kms de carretera se caractericen como ascendente cargado con pendiente significativa.

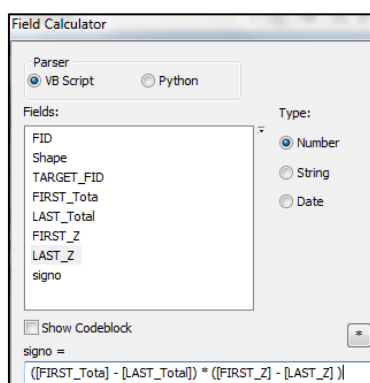


Figura 31. Cálculo del signo. Elaboración propia

Ahora tenemos dos capas con las que hacer **Identidad** con la capa base de nuestra red. Otorgándole a cada tramo, de longitud máxima mil metros en el caso de carreteras nacionales y autonómicas, el atributo de grado de curvatura (0, 1, 2) y pendiente ascendente cargado (0, 1).

Con todas estas características de red se añaden dos campos con cálculo de tiempo de ida (minutos) y de tiempo de vuelta en atravesar cada tramo. Estos campos están basados en las características del tramo según la tabla 2 en la que aparecen las velocidades de ida a por biomasa, y las de vuelta cargado, siendo siempre estas menores o iguales a las primeras.

TIPO	VEL IDA (kms/h)	VEL VUELTA (kms/h)	JERARQUÍA
Autovías	100	90	1
Tramos enlace de autovías	60	50	1
Carreteras Orden 1	90	80	1
Carreteras Orden 2	90	80	2
Carreteras Orden 3	80	70	2
Carreteras Orden 4	70	60	3
Tramos enlace carreteras	40	30	según tipo
Carreteras residenciales	30	30	3
Carreteras de servicio, varias tipologías, service, road, unclass...	40	30	3
Carreteras de Orden 1 a 4 que atraviesan zonas urbanas o industriales	40	30	según tipo
Decremento de velocidad (%) o Vmed en curvas de grado 1 sobre carreteras no autovías	20%	20%	según tipo
Decremento de velocidad (%) o Vmed en curvas de grado 2 sobre carreteras no autovías	40%	40%	según tipo
Decremento de velocidad (%) o Vmed en tramos de vuelta cargado y con pendiente media superior a..... en carreteras no autovías	NO	10% en ptes entre 4 y 10%	según tipo
Decremento de velocidad (%) o Vmed en tramos de vuelta cargado y con pendiente media superior a..... en carreteras no autovías	NO	20% en ptes superiores a 10%	según tipo

Tabla 2. Velocidades media según las características de las vías de la red principal

### 7 3. PROCESOS PARA LA INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN DEL IGN

El IGN ha proporcionado la información digital en hojas de la cartografía de escala 1:25.000 para cada provincia, por lo que hay que hacer una serie de procesos de preparación. El primero fue reprojectar adecuadamente parte de la información para tener todas las capas en ETRS 89. El primer proceso con herramienta espacial será una **Fusión** de todas las pistas y caminos de cada provincia. Posteriormente recortamos las capas de cada provincia con el área de estudio, herramienta **Recorte**. Debemos evitar la duplicidad de líneas que tiene lugar en las hojas compartidas por dos o tres provincias. Se van haciendo **selecciones por localización** ente provincias limítrofes y eliminando unas líneas u otras. Por último se debe hacer una **Fusión** de todas las provincias y con la capa red de carreteras principales asfaltadas.

Tras estos procesos semiautomáticos debemos crear las intersecciones entre de pistas y caminos entre sí, y con la red principal, **Planarizar**. Este proceso se hace con todos los tipos de línea seleccionados excepto Autopistas y Autovías (*Motorway*), no es lógico acceder a una autovía directamente desde un camino, por lo que no aparecerán conexiones entre IGN y *Motorlink*. En cuanto a la creación de nodos de acceso entre caminos y pistas con los Enlaces de autopistas y

autovías (*Motorway\_link*), se decide crearlos, ya que existen casos en los que son correctos. En cuanto a los casos en los que no lo son se decide asumir el error ya que probablemente el acceso entre el camino y la carretera que te lleve a la autovía esté próximo (estos posibles errores serán corregidos de forma manual como se verá más adelante).

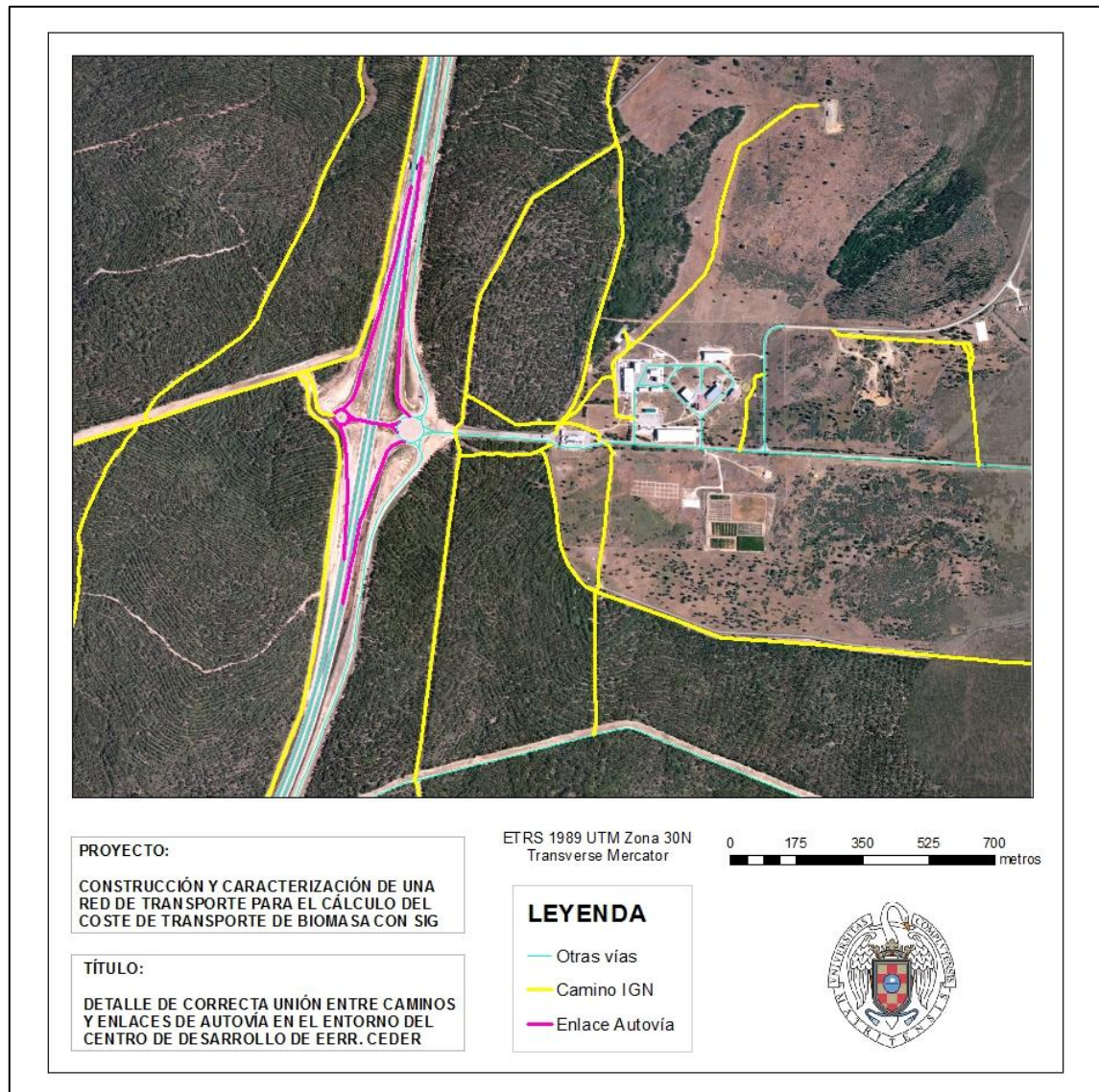


Figura 32. Detalle de unión de diferentes fuentes. Elaboración propia

Tras este proceso se comienzan a crear redes y hacer Líneas de Servicio para ver qué zonas quedan sin conexión. Las posibles soluciones a estas líneas inconexas son dos, ambas ubicadas en la caja de herramientas de **Edición**, Ampliar Línea y Alinear.

**Ampliar Línea**; Esta herramienta extiende segmentos de línea hasta la primera entidad que intercepta dentro de una distancia especificada. Si no hay ninguna entidad de intersección dentro de la distancia especificada, el segmento de línea no se extenderá (**Figura 33**).



**Alinear**: Desplaza puntos o vértices para que coincidan exactamente con los vértices, bordes o puntos finales de otras entidades. Se puede especificar reglas de alineación para controlar si los vértices de entrada se alinean al vértice, borde o extremo más cercano dentro de una distancia especificada (**Figura 34**).

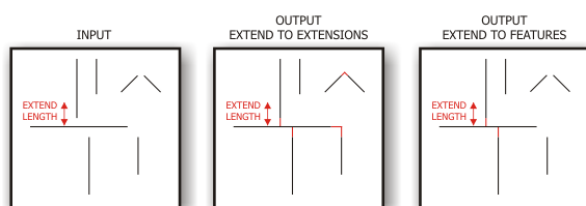


Figura 33. Esquema de Alargar Línea  
Fuente: resources.arcgis.com

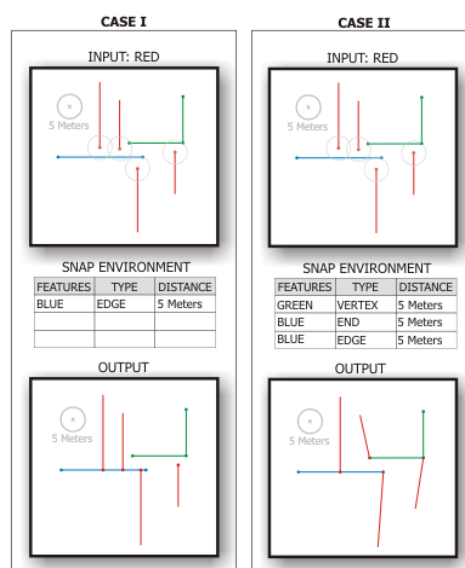


Figura 34. Esquema Alinear  
Fuente: resources.arcgis.com

La principal diferencia que hemos encontrado entre ambos sistemas es el **tiempo de ejecución**, muy superior en el caso de alargar líneas, llegando a ser limitante para su uso de forma masiva. El problema que encontramos al sistema de alineado es que **se alinean todos los vértices** internos o medios de la línea que están dentro del área de búsqueda y no sólo el vértice final de la línea a alargar.

La primera **comprobación de líneas sin conexión** nos muestra dos tipos de fallos, primero por no conexión entre mismos tipos de líneas del IGN por fallos de edición, y segundo no conexión entre líneas de la red *Open Street Map* y la del IGN. El primer tipo de error se soluciona con la herramienta Alinear, más adecuado obteniendo una solución óptima (**Figura 35**). Pero el segundo tipo de errores, adecuado a la función Ampliar Línea (**Figura 36**), no es posible realizarlo de forma general a la capa, si por pequeñas partes. Cuando lo hacemos a toda la capa o reduciéndolo a las líneas inconexas no se llega a completar el proceso (tiempo alcanzado sin terminar: 12h).

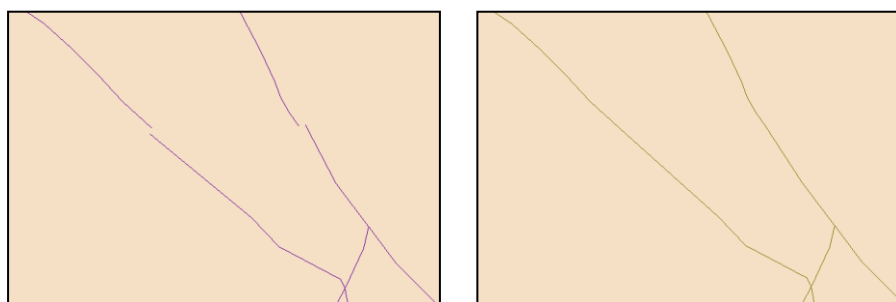


Figura 35. Ejemplo de Alinear líneas.

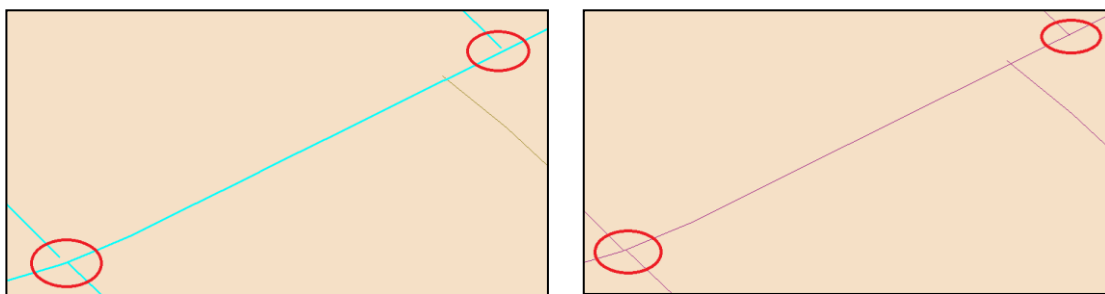


Figura 36. Ejemplo de Alargar líneas

Se decide emplear la herramienta Alinear para conectar todas las líneas. EL límite de líneas a conectar lo situamos en 15 metros de radio, los caminos o pistas a más distancia de la red principal no se conectarán y se eliminarán. Para poder evitar al máximo el problema del alineado de otros vértices además del vértice final se decide realizar el alineado por partes:

1.- Seleccionar de todos los tramos de caminos y pistas (con servicio y sin servicio) que no interceptan con la red principal y que están a **menos de 5 metros de distancia** de esta y aplicar la herramienta con radio de búsqueda de 5 metros. No aplicado sobre autopistas y autovías.

2.- Seleccionar los caminos y pistas que sigan sin tener conexión con la red principal y que están a **menos de 10 metros de distancia** y aplicar la herramienta con radio de búsqueda 10 metros. No aplicado sobre autopistas y autovías.

3.- Seleccionar los caminos y pistas que sigan sin tener conexión con la red principal y que están a **menos de 15 metros de distancia** y aplicar la herramienta con radio de 15 metros. No aplicado sobre autopistas y autovías.

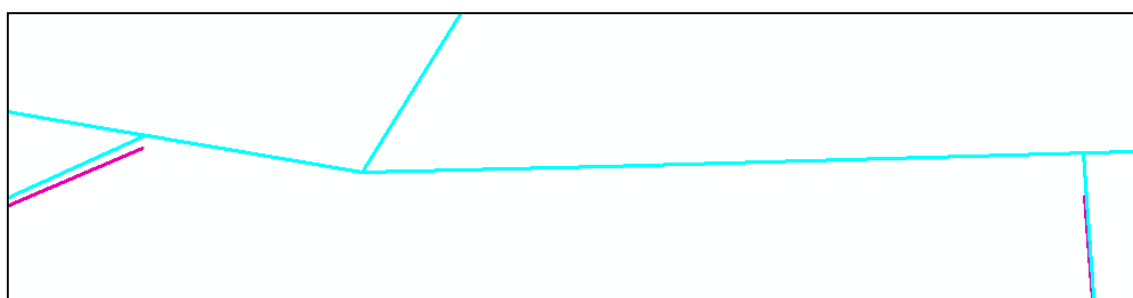


Figura 37. Antes y después del uso de la herramienta

La imagen muestra un ejemplo de la herramienta. Tras estas tres operaciones automáticas se realiza el planarizado para crear las conexiones de red y por último se opta a realizar la **revisión y arreglo manual de todo lo tramos enlace de autovías y autopistas**, debido a fallos al alinearse totalmente algunos caminos paralelos a estas vías. Esta revisión se aprovecha para corroborar y adecuar las conexiones entre caminos y tramos de autovía y autopistas.

Se crea una nueva red y línea de servicio con la capa modificada y se eliminan todos los caminos y pistas que no tengan servicio, serán los que se sitúen a más de 15 metros de la red principal. Y a los tramos de caminos y pistas añadidos a la capa red se les asigna tiempos de ida y vuelta según la tabla siguiente:

TIPO	VEL IDA (kms/h)	VEL VUELTA (kms/h)	JERARQUÍA
Pistas del IGN	30	20	3
Caminos del IGN	20	20	3

Tabla 3. Velocidades media según las características de las vías de la red secundaria

## 7 4. PROCESOS DE ANÁLISIS DE RED (NETWORK ANALYST)

Con la capa de red creada completamente se procede a crear el *DATASET DE RED* con la herramienta de ArcGis 10.1, última versión del programa. Durante el proceso de creación de red se van a añadir los atributos necesarios para luego obtener las Líneas de Servicio adecuadas (Figura 38).

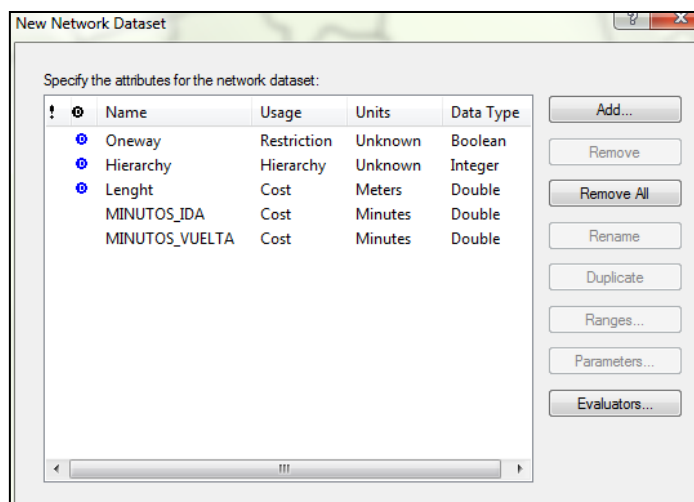


Figura 38. Atributos del DATASET de RED. Elaboración propia

Con la red creada vamos a hacer uso del servicio de red denominado **Área de Servicio**, al ejecutar este proceso le decimos al sistema que nos cree las Líneas de Servicio, rotas o divididas por cada minuto de trayecto de red (Figura 39), elegiremos la impedancia de tiempo de ida y la dirección desde la central de biomasa hacia fuera. Además elegiremos que se añada la información de longitud y que se haga de modo que se vaya acumulando. Posteriormente hacemos la misma operación eligiendo la impedancia de coste en tiempo de vuelta y con sentido hacia la central de biomasa.



Debemos destacar que no nos permite usar jerarquías. Pero la impedancia en coste de tiempos, según velocidades de la vía, ya hace que se comporte de un modo similar.

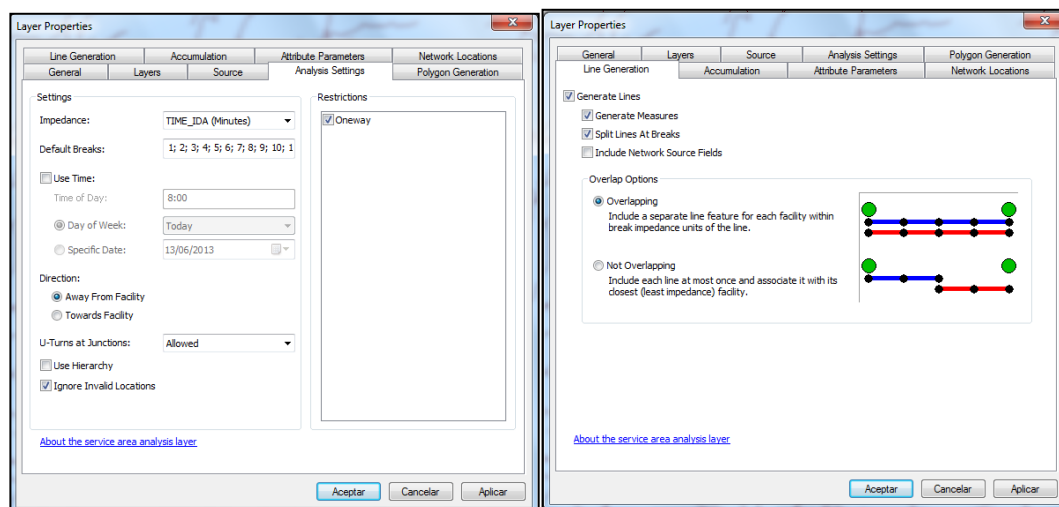


Figura 39. Propiedades de la capa. Elaboración propia

Hacemos ahora una intersección entre ambas líneas de servicio, obteniendo la suma de ambos tiempos. Después debemos seleccionar los tramos de esta capa que corresponden con caminos, pistas y vías de servicio, así tendré la capa definitiva a la que hacer las localizaciones o asignaciones raster, y que tendrá un campo con el atributo tiempo total de transporte en minutos y otro con la longitud recorrida de ida.

## **7 5. PROCESOS RASTER DE PREPARACIÓN DE CÁLCULOS DE COSTES**

Desde la capa vectorial de la zona de estudio se crea una capa raster que va a servir de base a los procesos de Análisis Espacial, este raster será de tamaño de celda 25x25 y no contará con la parte marina ni con la zona asturiana del área de estudio por decisión del CEDER (**Figura 40**). Este raster será el que utilizemos en los ajustes del entorno de análisis espacial raster como:

- 1- Coordenadas de salida
- 2- Extensión de los procesos
- 3- Alineado
- 4- Tamaño de celda
- 5- Máscara

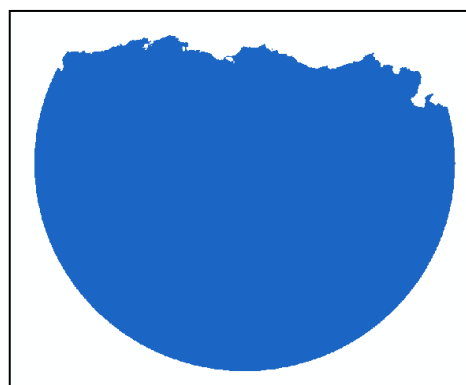


Figura 40. Raster de base

PENDIENTE (%)	COSTE (tiempo/metro)
0 - 10	26
10 - 25	38
25 - 45	50
45 - 65	75
>65	300

Desde este entorno de análisis vamos a crear la capa de pendientes en porcentaje basada en los MDE procedentes del satélite ASTER. Y esta capa será reclasificada como muestra la tabla situada a la izquierda de este texto.

Este reclasificado está mostrando las pendientes según las velocidades a las que se moverá el autocargador, y de ahí el tiempo en recorrer cada celda, que será el COSTE, creándose así la **Superficie de Fricción** sobre la que se simularán los movimientos del autocargador. Y para que estos movimientos se asemejen a la realidad vamos a dar valor Sin Dato a las celdas en las que aparezcan autovías, autopistas, carreteras nacionales y carreteras autonómicas (**Figura 41**). Crearemos una capa de valores 1 y Sin Dato la carretera y se multiplicara por la capa de costes, quedando así preparada para su uso.

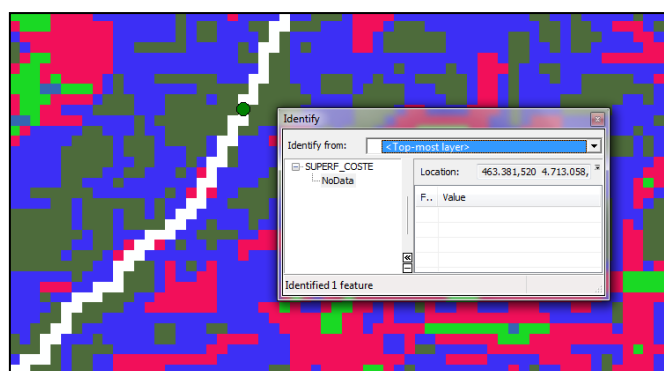


Figura 41. Superficie de Fricción. Elaboración propia

## **7 6. PROCESOS RASTER DE CÁLCULO DE COSTES**

El primer proceso es de cálculo de tiempo de transporte de autocargador mediante la herramienta **Distancia de Coste**, usando la anterior superficie de fricción. La distancia de coste asignada a cada celda representa el coste por unidad para moverse a través de la celda, en nuestro caso la velocidad en minutos por metro multiplicado por el valor de tamaño de celda, por lo tanto obtendremos de forma directa el valor en minutos de desplazamiento. Este valor acumulativo desde la celda origen a la celda fuente es la ruta de menor coste calculada por el sistema.

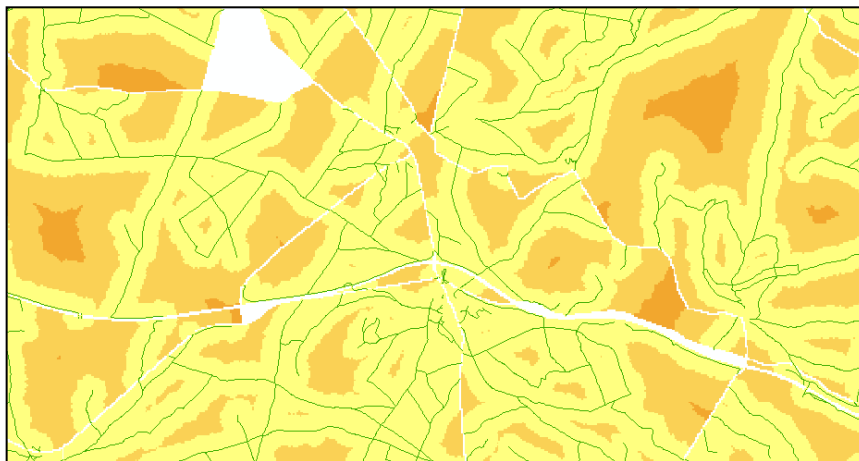


Figura 42. Detalle de la influencia de líneas sin dato (NO\_DATA). Elaboración propia

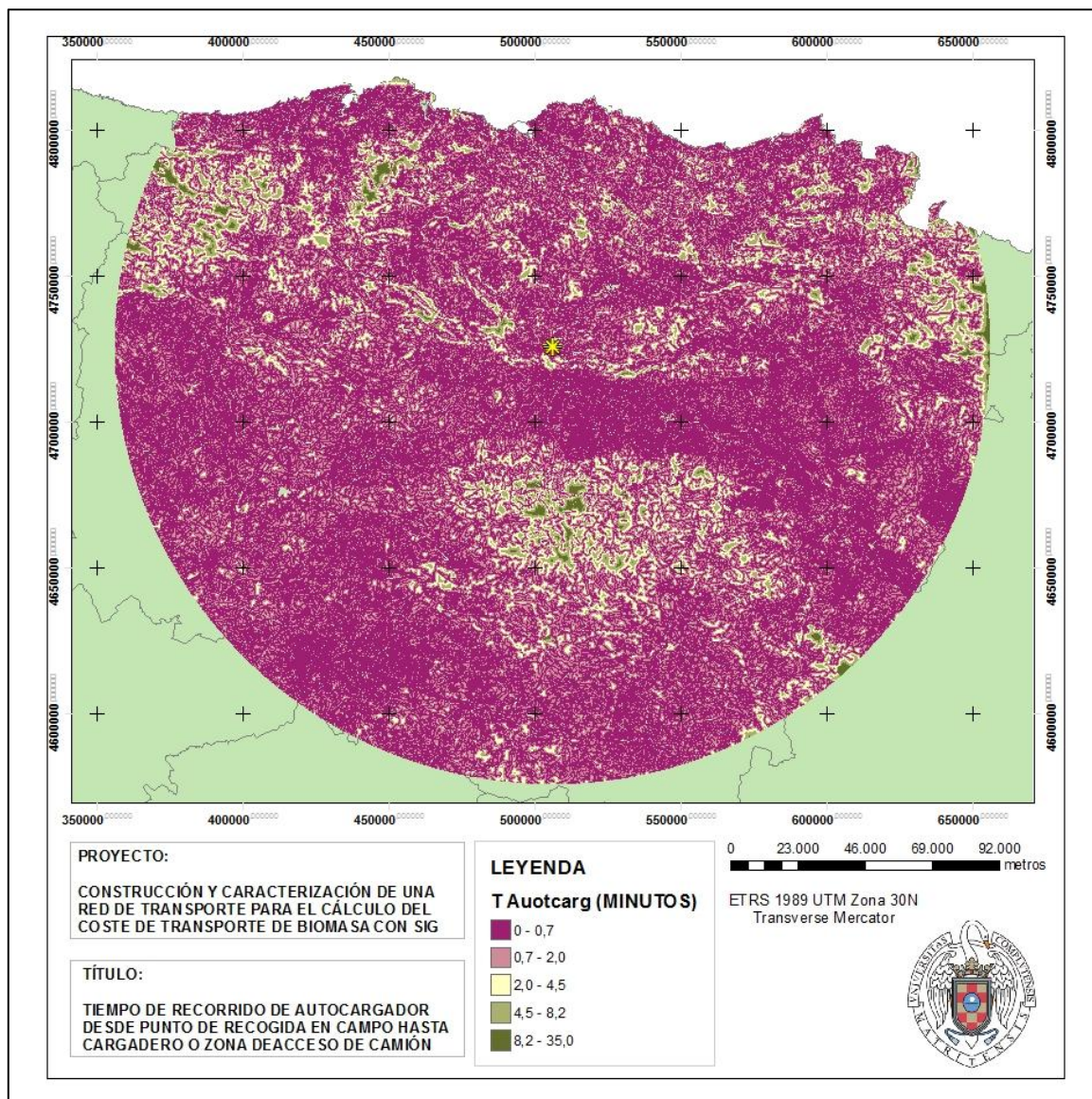


Figura 43. Tiempos de Autocargador. Elaboración propia



El segundo proceso es la **Asignación de Costes** (Figura 44), usando la misma superficie de fricción anterior y la capa de tramos fuente de la que obtendremos la asignación de tiempos de camión a cada celda, mediante el camino de mínimo coste, o camino de autocargador hacia esos tramos fuente (caminos, pistas y vías de servicio).

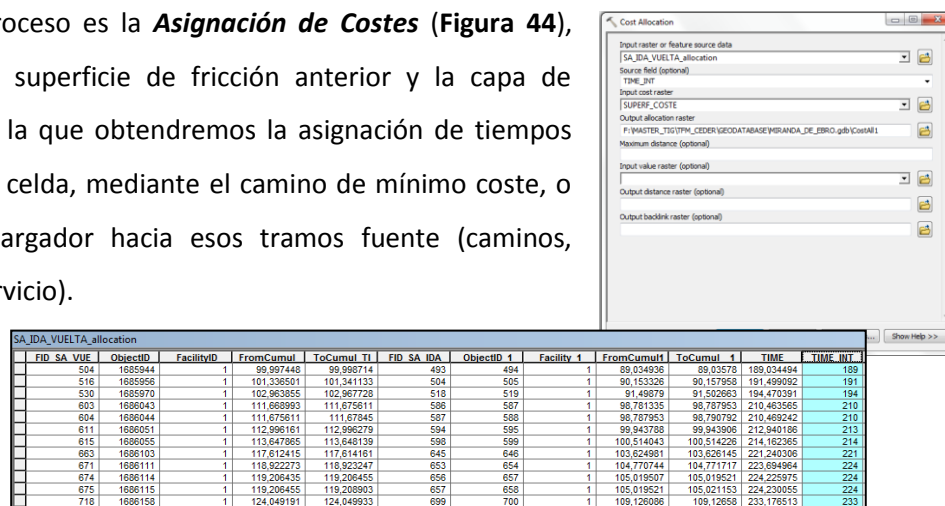


Figura 44. Detalle de procesos de Asignación de Costes

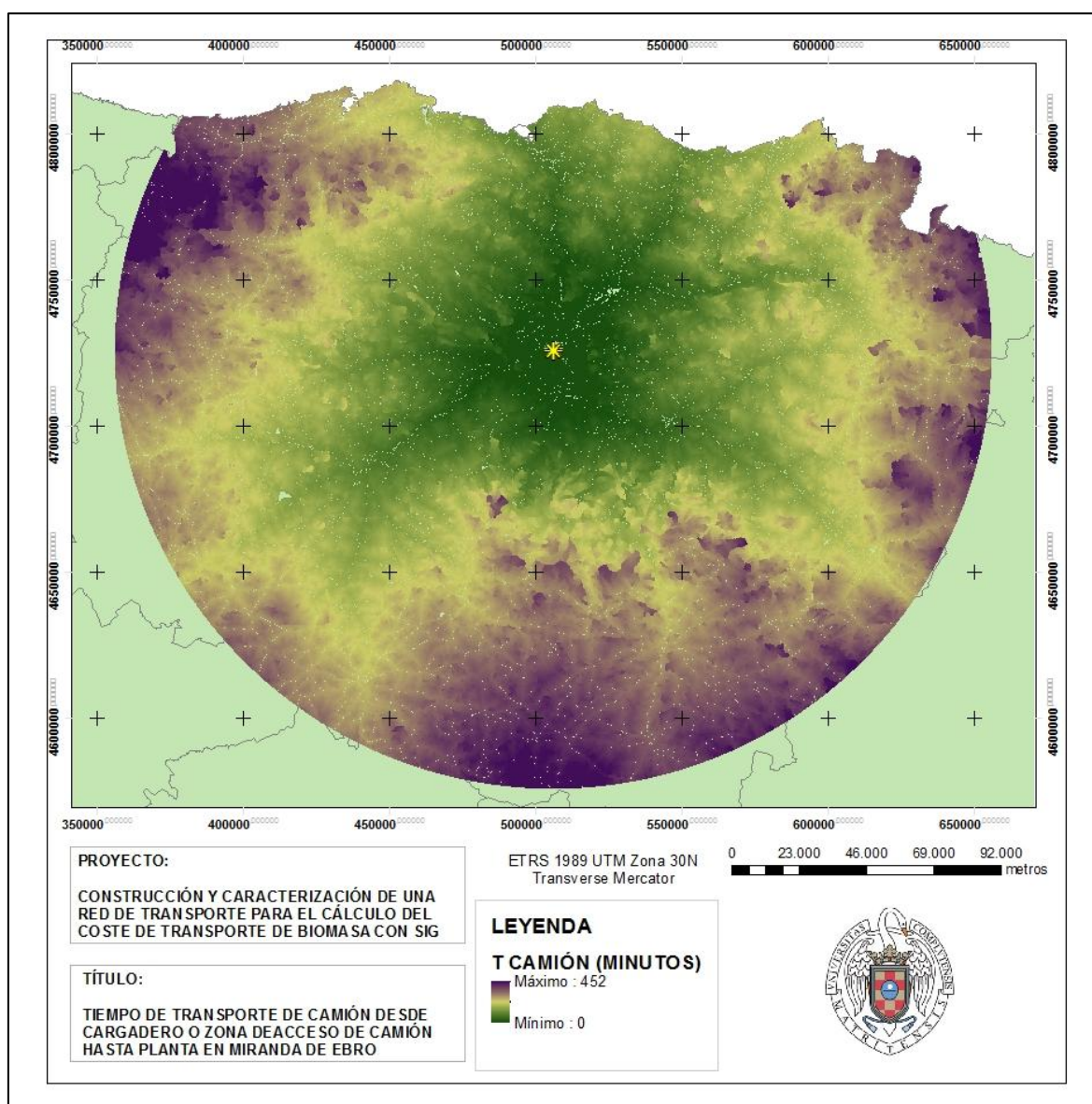


Figura 45. Tiempos de Transporte de Camión. Elaboración propia

Otro proceso de **Asignación de Costes** lo que transmitirá a cada celda de la zona de estudio no será el tiempo de camión, sino la distancia de ida desde la central hasta cada punto de carga correspondiente según la ruta asignada a cada celda. Esta distancia será el parámetro usado para el cálculo de los costes de combustible. Por lo tanto, el valor del campo a transmitir a cada celda de la superficie de estudio será la longitud recorrida por el camión según el menor tiempo de ruta, que es la impedancia con la que se ha calculado las Líneas de Servicio. Usamos la misma superficie de fricción de autocargador que anteriormente.

El resultado se muestra en la siguiente imagen, donde se aprecia la diferencia con la anterior con una “mancha” más radial y regular que con tiempos dependientes de velocidad, que nos mostraba la importancia de las vías rápidas como las autovías.

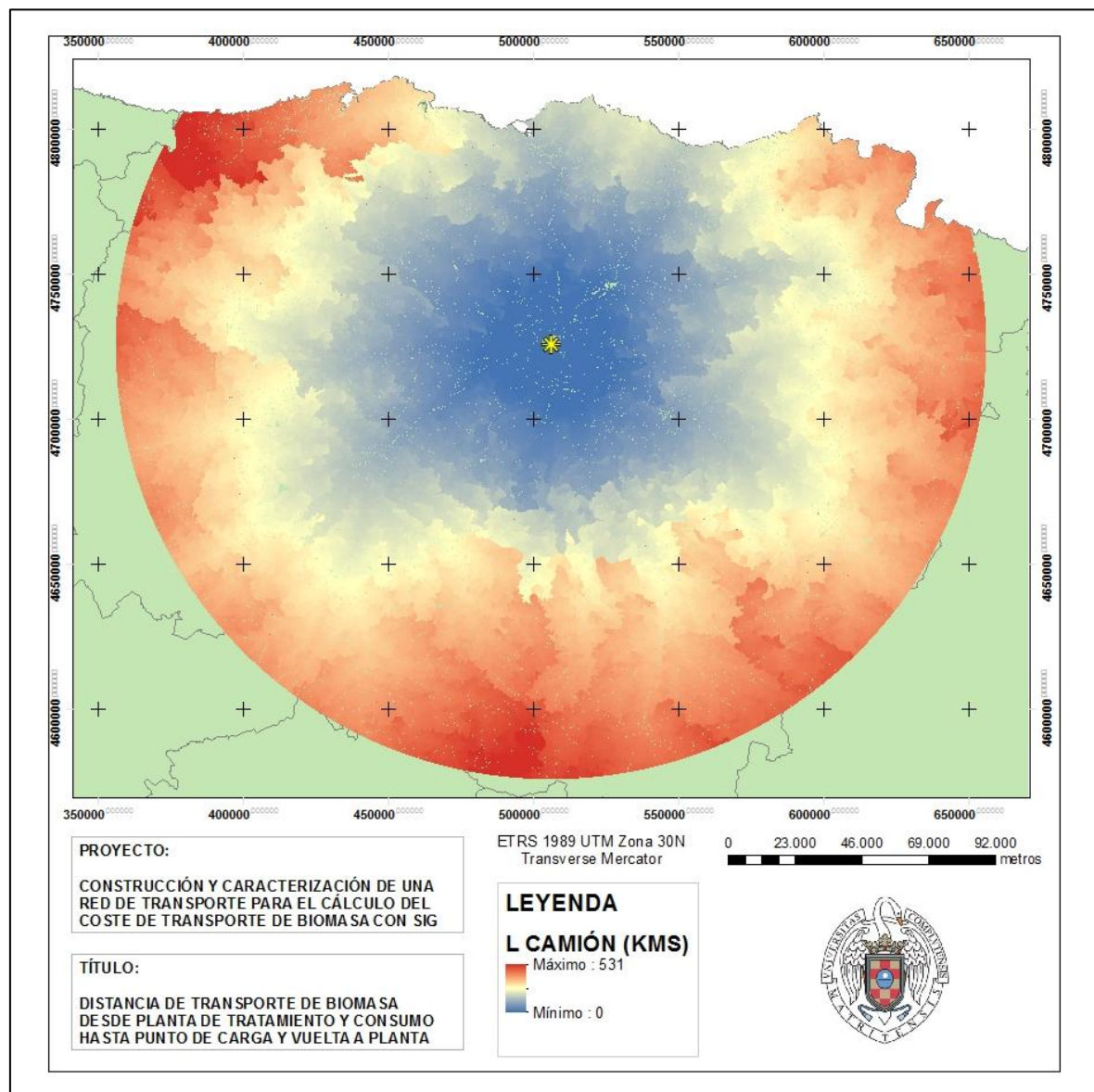


Figura 46. Distancias de Transporte de Camión. Elaboración propia



El cálculo de cada coste se puede hacer por separado y luego sumando los diferentes costes, o hacerlo de forma directa (**Figura 47**) siempre con la **calculadora raster**. En este cálculo intervienen los tres mapas anteriores de tiempo de autocargador, tiempo de camión y distancia de camión.

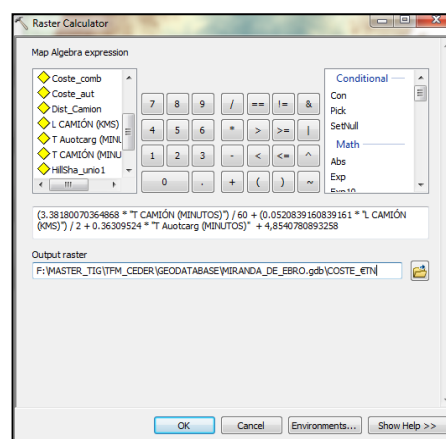


Figura 47. Cálculo del coste

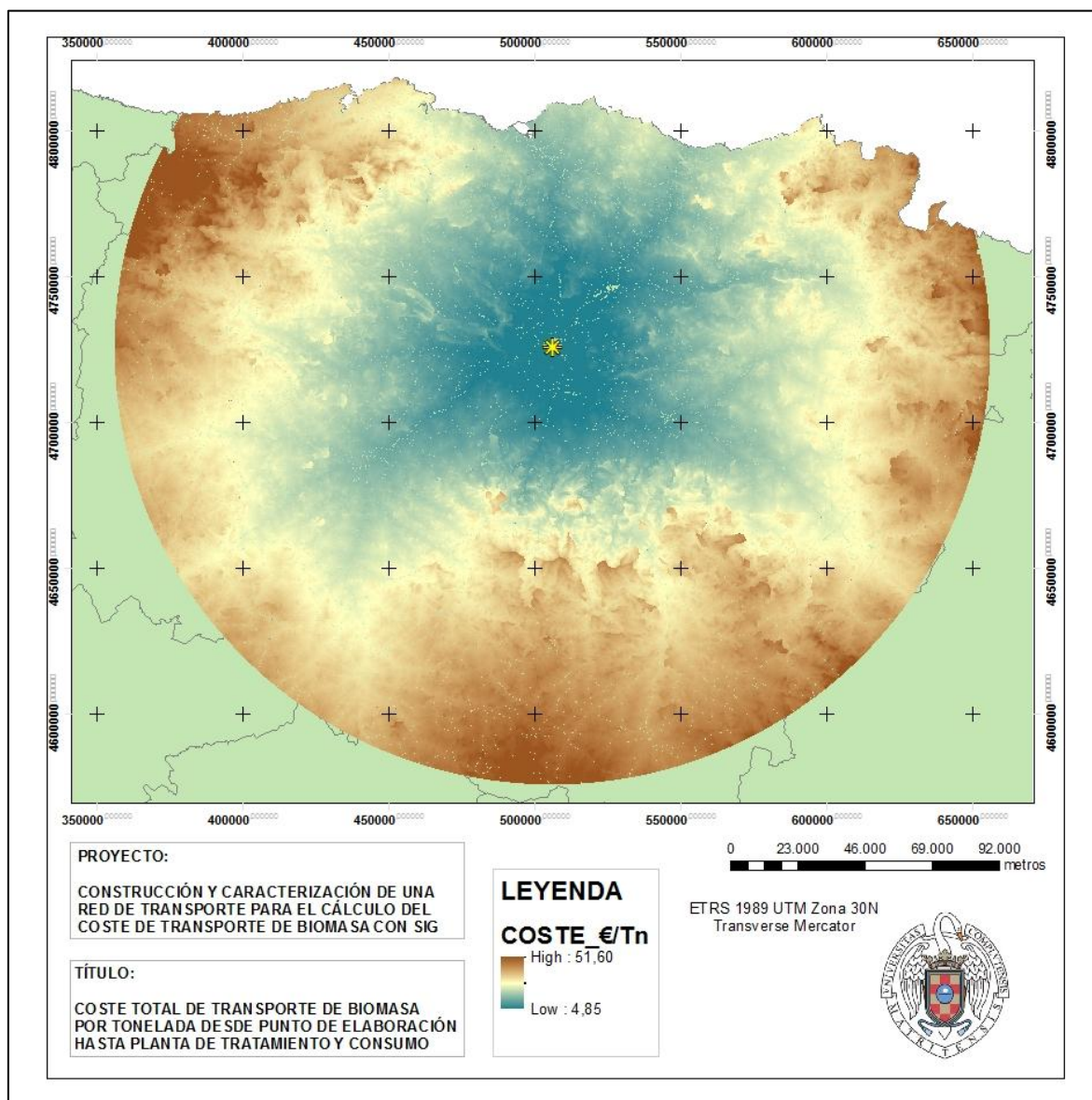


Figura 48. Coste Total Saca y Transporte de Biomasa. Elaboración propia

La imagen anterior muestra el mapa final de costes de transporte, con un máximo de 51,60 €/Tm. Si no incluyéramos los costes de autocargador sería un valor máximo de transporte por carretera y pista de 41,15 €/Tm.

Estableciendo la rentabilidad del transporte en 25 €/Tm (**Figura 49**) podemos comprobar que zonas son en las que se puede obtener biomasa para nuestra central eléctrica.

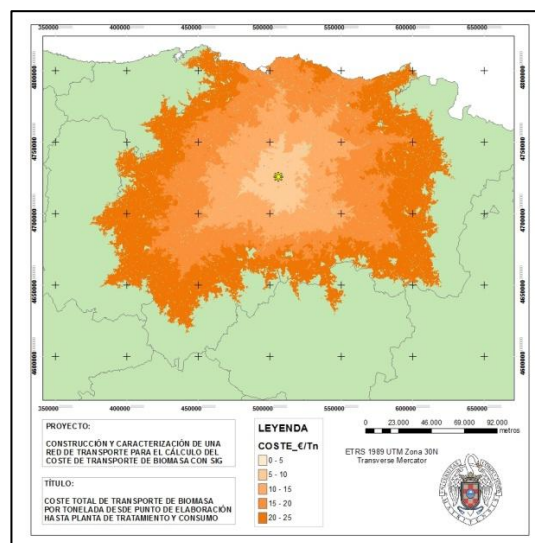


Figura 49. Coste máximo 25 €/Tm. Elaboración Propia

## 8 CONCLUSIONES

Hemos podido construir una red de transporte para camión en la que aparecen pistas y caminos, lo que no se había realizado hasta la fecha. Si bien la fuente presenta fallos, estos pueden ser asumibles debido a la magnitud de la zona de estudio y al intento de refinar las características de la red desde otros ámbitos. A medida que se amplíe la red del *Open Street Map* puede que esta por si sola sea adecuada para realizar los análisis, mientras tanto, creemos adecuado el uso de la red de pistas y caminos del IGN por su homogeneidad de criterio. Un factor importante es la transitabilidad de estas pistas por un camión con remolque, hemos supuesto que la red del IGN lo es al ser dos únicas categorías y criterio único, en teoría. En *Open Street Map* existe el problema de la categorización de las vías, heterogénea por los numerosos participantes, pero sin duda mejor definida en cuanto a calidad de edición y acercamiento a la realidad. Por lo tanto, podemos confirmar que los principales objetivos propuestos se han conseguido.

Aún así, hemos podido comprobar la falta de algunas carreteras autonómicas importantes en *Open Street Map*, que hemos tenido que añadir. Este hecho, junto con otros procesos manuales ya descritos anteriormente, hace que no sea posible una metodología automática. Teniendo que realizar comprobaciones visuales o semiautomáticas y posteriores procesos manuales de edición, encontrándonos estos problemas en la parte vectorial o de creación de red para la construcción del *Dataset* de Red.



Otra diferencia de lo realizado hasta la fecha (costes basados en distancia y una velocidad media única) es la caracterización de la red de forma que podamos conseguir atribuir a cada tramo de la misma una determinada velocidad media de circulación, consiguiendo así un resultado más parecido a la realidad. Igualmente, se ha creado otra metodología para buscar el coste de llevar la biomasa desde el punto de elaboración hasta el camión. Antes se basaba en una distancia euclidiana y en la pendiente de la zona de extracción, haciéndolo ahora en una distancia de coste que se basa en la pendiente a lo largo de todo el trayecto de transporte del autocargador. Estos procesos raster si se pueden automatizar e incluirlos en un Modelo Construido.

La metodología para caracterizar el grado de curvatura de las carreteras y las pendientes ascendentes de vuelta muestran que el conocimiento de los SIG y sus procesos y resultados, pueden suponer una infinita fuente para el análisis y obtención de información geográfica. En el caso que nos ocupa, esta información geográfica tiene un alto valor, ya que hablamos de un sector que necesita “echar muchos” números antes de poder enfrentarse a la realización de un proyecto de inversión.

## **9 BIBLIOGRAFÍA**

**CEDER-CIEMAT** (2009) “Desarrollo de una Aplicación en base de Sistema de Información Geográfica (SIG) para la Evaluación de Recursos de Biomasa a través de Internet”.

**COITF** (2011) “Principales obstáculos y retos para el desarrollo comercial de la biomasa forestal”. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales. Sevilla.

**Esteban, L.S., García, R., Carrasco, J.** (2008). «Biomass Resources and Costs in Spain and Southern EU Countries. Towards a Common Methodology and Assessment», en Schmid, J., Grimm, H.P., Helm, P. y Grassi, A. (Ed.): Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition. Florence, ETA-Renewable Energies.

**Esteban, L.S., Ortiz P.** (2004) “Cuantificación de los recursos de biomasa forestal en la provincia de Soria y evaluación de alternativas para su aprovechamiento energético”. Foresta, nº 75, p.p. 17-25.

**Garañeda, R.J. y Bengoa, L.** (2005) “Estudio de disponibilidad de biomasa en seis zonas de Castilla y León”, en S.E.C.F. (Ed.): La ciencia forestal: respuestas para la sostenibilidad. 4º Congreso Forestal Español. Zaragoza, Sociedad Española de Ciencias Forestales.

**González, A.** (2012). “Las tendencias de la biomasa sólida de aquí a 2020. AVEBIOM Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa”. Foresta, nº 53, p.p. 8-11.

**IDAE** (2007). "Biomasa: Maquinaria agrícola y forestal". Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

**IDAE** (2007). "Energía de la biomasa". Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

**Martín P.** (2012). "Evaluación, planificación, y viabilidad económica de la explotación de los recursos de biomasa forestal de la zona noroccidental de Aragón". Foresta, nº 50, p.p. 44-51.

**Solano, J.M.** (2012). "La planificación estratégica nacional en materia de uso energético de la biomasa forestal residual". Foresta, nº 53, p.p. 12-15.

**Tolosana, E., Ambrosio, Y., Laina, R., Martínez, R.** (2008). "Guía de la maquinaria para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal". ETSI Montes y EUIT Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.

**Tolosana, E., V.M. González & S. Vignote** (2004). "El aprovechamiento maderero". 2.ª ed. Mundi-Prensa. Madrid.

La principal fuente de información sobre el software ArcGis 10.1 se ha obtenido de la web:

<http://resources.arcgis.com/es/help/>